

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
Кафедра електропостачання**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Науковий керівник кафедри

\_\_\_\_\_ С.П. Денисюк

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
спеціалізації Енергетичний менеджмент та енергоефективність**

**на тему: «Оцінювання та контроль ефективності використання електричної  
енергії на підприємстві»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) VI курсу, групи ОН-зб1м

Бірюков Дмитро Андрійович

\_\_\_\_\_

Керівник:

к.т.н., доц. Бориченко О.В.

\_\_\_\_\_

Консультант з нормоконтролю:

ас. Прокопенко І.Д.

\_\_\_\_\_

Рецензент:

доцент кафедри теплотехніки та енергозбереження,

к.т.н., доц. Студенець В.П.

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
Кафедра електропостачання**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Енергетичний менеджмент та енергоефективність»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Науковий керівник кафедри

\_\_\_\_\_ С.П. Денисюк

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту**

**Бірюкова Дмитра Андрійовича**

1. Тема дисертації «Оцінювання та контроль ефективності використання електричної енергії на підприємстві»

науковий керівник дисертації к.т.н., доц. Бориченко О.В.

затверджені наказом по університету від «31» березня 2018 р. №917-с

2. Термін подання студентом дисертації «24» травня 2018 року

3. Об'єкт дослідження процес аналізу, планування та оперативного контролю обсягів споживання електричної енергії на підприємстві.

4. Вихідні дані дані обліку енергоресурсів на підприємстві; літературні джерела за темою дисертації

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: аналіз методів планування та контролю обсягів енергоспоживання на підприємствах; розроблення алгоритму скорочення часу, необхідного для побудови систем оперативного контролю і планування енергоспоживання; розроблення методики визначення оптимального періоду контролю ефективності енергоспоживання для технологічних об'єктів; аналіз методик відбору експертним шляхом основних факторів, які необхідно враховувати при встановленні планових змінних в системах оперативного контролю і планування енергоспоживання; вибір прийнятного методу побудови багатфакторних математичних моделей, необхідних для встановлення «стандартів» енергоспоживання в системах оперативного контролю.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу принципи побудови традиційних систем контролю і планування, недоліки існуючої методики побудови систем контролю, скорочення витрат часу на побудову систем, визначення оптимального періоду контролю в системах, аналіз методів експертного опитування, вибір методів обробки даних при побудові математичних моделей.
7. Орієнтовний перелік публікацій одна публікація тез на X Міжнародній науково-технічній конференції «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА» від 27.04.2018 р.
8. Консультанти розділів дисертації  
*Нормоконтроль* *ас. Прокопенко І.Д.*
9. Дата видачі завдання *12 березня 2018 року*

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання	12.03.2018	Виконано
2	Аналіз літературних джерел	12.03.2018 -17.03.2018	Виконано
3	Складання плану роботи	18.03.2018 -25.03.2018	Виконано
4	Робота над першим розділом	26.03.2018 -06.04.2018	Виконано
5	Робота над другим розділом	07.04.2018 -17.04.2018	Виконано
6	Робота над третім розділом	18.04.2018 -28.04.2018	Виконано
7	Робота над четвертим розділом	29.04.2018 - 09.05.2018	Виконано
8	Оформлення ПЗ, нормо контроль, попередній захист	10.05.2018 - 20.05.2018	Виконано

Студент

Д.А. Бірюков

Науковий керівник дисертації

О.В. Бориченко

## РЕФЕРАТ

**Структура і обсяг роботи.** Магістерська дисертація на тему: «Оцінювання та контроль ефективності використання електричної енергії на підприємстві» складається із вступу, 4 розділів, висновків, переліку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 122 сторінки основного тексту, в тому числі 15 рисунків, 29 таблиць, 476 бібліографічних найменувань за переліком посилань.

**Актуальність теми.** Необхідність практичного розв'язання питань енергозбереження та енергоефективності в Україні ні в кого не викликає сумнівів, принаймні протягом останніх 10 років, також це усвідомлюється на всіх рівнях державного управління.

За останні десятиліття в Україні були створені різні нормативно-правові й методичні документи у сфері енергозбереження. Про це, зокрема, свідчать такі факти як прийняття в законодавчих актів в сфері енергозбереження та енергоефективності, створення державних органів у цій сфері, розроблення державних програм з енергозбереження та енергоефективності, програми підтримки нетрадиційних і поновлюваних джерел енергії, формування Державного фонду енергозбереження та запровадження державних пільгових кредитних програм для споживачів для підвищення їх рівня енергоефективності.

Однак суттєвих практичних результатів енергозбереження в Україні на даний час не отримано. По-перше, це пов'язано з недостатнім рівнем економічної зацікавленості споживачів паливно-енергетичних ресурсів у запровадженні енергозберігаючого устаткування, заходів і технологій, а також недостатня зацікавленість, як держави, так і інших потенційних інвесторів у вкладенні коштів у енергозбереження (хоча в економічно розвинених країнах світу це вважається прибутковим бізнесом). По-друге, це як наслідок першого, недостатнє фінансування або практична відсутність коштів, необхідних для впровадження енергозберігаючого устаткування, заходів і технологій, що було і є одним з найбільш серйозних перешкод для досягнення в Україні помітних результатів у цій

сфері. З одного боку, на підприємствах, в установах і організаціях, де безпосередньо є необхідність і реальні можливості енергозбереження, як правило, «не знаходиться» власних коштів на такі цілі. З іншого боку, фінансування енергозбереження з боку державного бюджету, як і залучення для цих цілей позикових коштів, також є вкрай недостатнім для досягнення значних результатів.

Суттєво ускладнює ситуацію недосконалість українського законодавства, яке, зокрема, не дозволяє залучати для цілей енергозбереження кошти, отримані в результаті економії витрат на паливно-енергетичні ресурси, досягнутої за рахунок уже впроваджених енергозберігаючих заходів.

Питання енергозбереження є актуальним на сьогоднішній день і залишатиметься таким у майбутньому. Потрібно покращувати існуючі методики, а також шукати нові способи його вирішення не лише на загальнодержавному рівні, але й на рівні кожного окремого виробництва, кожної окремого технологічного процесу. Енергозбереження має стати важливим для керівників усіх галузей промисловості, оскільки воно дозволить заощаджувати величезні кошти, що витрачаються на марні витрати енергії на виробництві.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконані в роботі дослідження відповідають напряму «Енергетика та енергоефективність» Закону України № 2519-VI від 09.09.2010 р. «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки», стратегічним пріоритетним напрямом інноваційної діяльності в Україні на 2003-2013 роки «Новітні ресурсозберігаючі технології» Закону України № 433-IV від 16.01.2003 р. «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», Комплексній програмі НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» «Енергетика сталого розвитку» і направленості тематики НДР кафедри електропостачання НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського».

**Метою магістерської дисертації** є удосконалення методики побудови систем оперативного контролю енергоефективності на підприємстві, що дозволяла створювати такі системи з мінімальними витратами часу і контролювати

ефективність енергоспоживання технологічних об'єктів з оптимальною періодичністю.

Для досягнення зазначеної мети дослідження були вирішені наступні завдання:

- проаналізовано методи планування та контролю обсягів енергоспоживання на підприємствах;
- розроблено алгоритм скорочення часу, необхідного для побудови систем оперативного контролю і планування енергоспоживання;
- запропоновано методику визначення оптимального періоду контролю ефективності енергоспоживання для технологічних об'єктів;
- проаналізувано методику відбору експертним шляхом основних факторів, які необхідно враховувати при встановленні планових змінних в системах оперативного контролю і планування енергоспоживання;
- обрано прийнятний метод побудови багатфакторних математичних моделей, необхідних для встановлення «стандартів» енергоспоживання в системах оперативного контролю.

**Об'єктом дослідження** є процес аналізу, планування та оперативного контролю обсягів споживання електричної енергії на підприємстві.

**Предметом дослідження** є методи та алгоритми аналізу, планування та оперативного контролю обсягів енергоспоживання на підприємстві.

**Методи дослідження.** В роботі використовувались теоретичні методи та експериментальні дослідження, такі як: статистичні методи моделювання; методи фінансової оцінки проектів; методи планування процесів; методи аналізу математичних моделей.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному: у розробленні алгоритму скорочення часу, потрібного для збирання даних, необхідних для побудови систем оперативного контролю і планування енергоспоживання технологічних об'єктів. Запропонований алгоритм скорочення тривалості побудови таких систем для технологічних об'єктів базується на попередньому встановленні

«стандартів» енергоспоживання для мінімальної періодичності контролю, яка дорівнює одній годині, що дає можливість вже через одну або кілька діб після початку збирання вихідних даних здійснювати контроль ефективності використання палива або енергії на об'єкті, що розглядається. Окрім того, було запропоновано методику визначення оптимального періоду контролю енергоефективності, найдоцільнішого з технологічної та економічної точки зору інтервалу часу між двома найближчими перевірками виконання встановленого «стандарту», що визначається за допомогою економічно-фінансового аналізу визначення вартості ймовірних втрат електричної енергії і фінансових витрат на проведення контролю.

**Практичне значення роботи.** Отримані в дисертаційній роботі результати та розроблені пропозиції можуть бути практично використовуватися з метою удосконалення та подальшого розвитку систем оперативного контролю та планування енергоспоживання технологічних об'єктів в Україні.

**Апробація результатів роботи.** Результати магістерської дисертації були обговоренні на практичних заняттях з курсу: «Науково-дослідна робота за темою магістерської дисертації» та одна публікація тез доповіді на X Міжнародній науково-технічній конференції «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА» від 27.04.2018 р., Інститут енергозбереження та енергоменеджменту, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Публікації.** За результатами досліджень було опубліковано одну тезу доповіді на X Міжнародної науково-технічної конференції «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА».

Для виконання розрахунків у розділі 3 магістерської дисертації використовувалось наступне програмне забезпечення: STATISTICA; MS Excel.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** енергоспоживання виробничо-господарських об'єктів, енергозбереження, енергетична ефективність, контроль ефективності енерговикористання, система оперативного контролю і планування, оптимальний період контролю процесу енергоспоживання.

## ABSTRACT

**Structure and scope of work.** Master's dissertation on the topic: "The evaluation and control of the efficiency of electric energy use in the enterprise" consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, a list of sources used. The total volume of work consists of 122 pages of the main text, including 15 drawings, 29 tables, 47 bibliographic titles in the list of references.

**Actuality of theme.** The need for practical solution of energy saving and energy efficiency issues in Ukraine is unquestionable, at least during the last 10 years, it is also recognized at all levels of public administration.

Over the past decades, various regulatory and methodological documents in the sphere of energy saving have been created in Ukraine. This is evidenced in particular by the adoption of legislative acts in the field of energy saving and energy efficiency, the creation of state bodies in this area, the development of state programs on energy saving and energy efficiency, the program of support for non-traditional and renewable energy sources, the formation of the State Energy Saving Fund and the introduction of state incentives consumer credit programs to increase their energy efficiency.

However, significant practical results of energy saving in Ukraine have not been received at this time. First, this is due to the insufficient level of economic interest of consumers of fuel and energy resources in the implementation of energy saving equipment, measures and technologies, as well as insufficient interest of both the state and other potential investors in investing in energy saving (although in economically developed countries of the world this is considered a profitable business). Secondly, this is the consequence of the first, lack of financing or the lack of funds necessary for the implementation of energy saving equipment, measures and technologies, which was and is one of the most serious obstacles to achieve significant results in Ukraine in this area. On the one hand, in enterprises, institutions and organizations where there is a direct need for and real possibilities of energy saving, as a rule, there is "no" own funds for such purposes. On the other hand, the financing of energy saving from the state budget, as well



as the attraction of borrowed funds for these purposes, is also extremely insufficient for achieving significant results.

The imperfection of Ukrainian legislation is complicated by the situation, which in particular does not allow to attract for the purposes of energy saving the funds received as a result of saving of expenses on fuel and energy resources achieved at the expense of already implemented energy-saving measures.

The issue of energy conservation is relevant today and will remain so in the future. It is necessary to improve the existing methods, as well as to find new ways to solve it not only at the national level, but also at the level of each individual production, each individual technological process. Energy saving should become important for the leaders of all industries as it will save you huge amounts of money spent on useless energy costs in production.

**Relationship of work with scientific programs, plans, themes.** The research carried out in the work corresponds to the direction "Energy and Energy Efficiency" of the Law of Ukraine No. 2519-VI of 09.09.2010 "On Priority Areas of Science and Technology Development", Strategic Priority Areas of Innovation Activities in Ukraine for 2003-2013 "Innovative Resource Saving Technologies" Law of Ukraine No. 433-IV of 16.01.2003 «On Priority Areas of Innovation Activity in Ukraine», Integrated Program of NTUU «KPI», «Energy of Sustainable Development» and directions of research topics of the Department of Electrical Supply of NTUU «KPI».

**The purpose of the master's thesis** is to improve the methodology of constructing systems of operational control of energy efficiency at the enterprise, which allowed to create such systems with minimal time expenditures and to control the efficiency of energy consumption of technological objects with optimal periodicity.

To achieve this goal, the following tasks were solved:

- methods of planning and control of energy consumption at enterprises are analyzed;
- an algorithm for reducing the time required for the construction of operational control and energy planning systems is developed;

- a methodology for determining the optimal period of energy efficiency control for technological objects is proposed;
- analysis of the method of expert selection of the main factors to be taken into account when establishing planned variables in operational control and energy planning systems;
- an acceptable method for constructing multifactor mathematical models necessary for establishing "standards" of energy consumption in operational control systems is chosen.

**The object of the research** is the process of analysis, planning and operational control of the volume of electricity consumption at the enterprise.

**The subject of the study** is methods and algorithms for analysis, planning and operational control of energy consumption in the enterprise.

**Research methods.** The theoretical methods and experimental researches were used in the work, such as: statistical methods of modeling; methods of financial evaluation of projects; methods of process planning; methods of analysis of mathematical models.

**The scientific novelty of the obtained results** is as follows: in the development of the algorithm for reducing the time needed to collect the data necessary for the construction of operational control systems and planning energy consumption of technological objects. The proposed algorithm for shortening the length of construction of such systems for technological facilities is based on the preliminary setting of "standards" of energy consumption for a minimum periodicity of control, which is equal to one hour, which makes it possible, one or more days after starting the collection of raw data, to control the efficiency of the use of fuel or energy at the object under consideration. In addition, a method was proposed for determining the optimal period for energy efficiency control, the most appropriate from the technological and economic point of view, between the two closest verifications of the implementation of the established "standard", determined by means of an economic-financial analysis of the determination of the cost of potential losses of electric energy and the financial costs of conducting control.

**Practical value of work.** The results and proposals developed in the dissertation can be practically used to improve and further develop the systems of operational control and planning of energy consumption of technological facilities in Ukraine.

**Approval of the results of work.** The results of the master's thesis were discussed on practical lessons on the course: "Research work on the theme of the master's thesis" and X International scientific and technical conference "ENERGY. ECOLOGY. HUMAN" dated April 27, 2018, Institute of Energy Saving and Energy Management, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

**Publications.** According to the results of the research, one thesis of the report was published at the Xth International Scientific and Technical Conference "ENERGY. ECOLOGY. MAN".

To perform calculations in section 3 of the master's thesis the following software was used: STATISTICA; MS Excel.

**KEY WORDS:** energy consumption of industrial and economic objects, energy saving, energy efficiency, energy efficiency control, operational control and planning system, optimal period of energy consumption control.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1 ОЦІНКА ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯ НА ОСНОВІ ПОБУДОВИ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ.....	18
1.1 Основні принципи побудови традиційних систем контролю енергоспоживання.....	18
1.2 Встановлення «стандартів» енергоспоживання для традиційних систем контролю енергоспоживання .....	23
1.3 Недоліки існуючої методики побудови систем оперативного контролю енергоспоживання.....	31
Висновки до розділу 1 .....	34
РОЗДІЛ 2 РОЗВИТОК ПРИНЦИПОВИХ ПІДХОДІВ ДО ПОБУДОВИ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ .....	36
2.1 Скорочення витрат часу на побудову систем оперативного енергоспоживання технологічних об'єктів .....	36
2.2 Визначення оптимального періоду контролю енергоефективності із застосуванням систем оперативного контролю .....	47
Висновок до розділу 2.....	55
РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ «СТАНДАРТІВ» ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В СИСТЕМАХ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ.....	57
3.1 Аналіз методів відбору факторів, що впливають на енергоспоживання технологічних об'єктів .....	57
3.1.1 Методи експертного оцінювання .....	57
3.1.2 Процедура обробки даних за методом експертних оцінок .....	66
3.2 Вибір методів обробки і аналізу даних при побудові математичних моделей енергоспоживання .....	71

3.2.1 Моделі парної регресії .....	71
3.2.2 Побудова рівнянь парної регресії.....	72
3.2.3 Характерні види нелінійної регресії.....	74
3.2.4 Оцінка щільності зв'язку між залежною та незалежною змінною .....	76
3.2.5 Багатофакторна регресія та кореляція.....	80
3.3 Приклад встановлення «стандарту» енергоспоживання на основі рівняння багатофакторної регресії.....	85
Висновки до розділу 3 .....	99
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	100
4.1 Етапи розроблення стартап-проекту .....	100
4.2 Опис ідеї проекту та визначення загального напрямку використання .....	102
4.3 Аналіз ринкових можливостей реалізації стартап-проекту .....	103
4.4 Розробка стратегії ринкового впровадження проекту.....	109
Висновки до розділу 4 .....	115
ВИСНОВКИ .....	116
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	118

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Необхідність практичного розв'язання питань енергозбереження та енергоефективності в Україні ні в кого не викликає сумнівів, принаймні протягом останніх 10 років, також це усвідомлюється на всіх рівнях державного управління.

За останні десятиліття в Україні були створені різні нормативно-правові й методичні документи у сфері енергозбереження. Про це, зокрема, свідчать такі факти як прийняття в законодавчих актів в сфері енергозбереження та енергоефективності, створення державних органів у цій сфері, розроблення державних програм з енергозбереження та енергоефективності, програми підтримки нетрадиційних і поновлюваних джерел енергії, формування Державного фонду енергозбереження та запровадження державних пільгових кредитних програм для споживачів для підвищення їх рівня енергоефективності.

Однак суттєвих практичних результатів енергозбереження в Україні на даний час не отримано. По-перше, це пов'язано з недостатнім рівнем економічної зацікавленості споживачів паливно-енергетичних ресурсів у запровадженні енергозберігаючого устаткування, заходів і технологій, а також недостатня зацікавленість, як держави, так і інших потенційних інвесторів у вкладенні коштів у енергозбереження (хоча в економічно розвинених країнах світу це вважається прибутковим бізнесом). По-друге, це як наслідок першого, недостатнє фінансування або практична відсутність коштів, необхідних для впровадження енергозберігаючого устаткування, заходів і технологій, що було і є одним з найбільш серйозних перешкод для досягнення в Україні помітних результатів у цій сфері. З одного боку, на підприємствах, в установах і організаціях, де безпосередньо є необхідність і реальні можливості енергозбереження, як правило, «не знаходиться» власних коштів на такі цілі. З іншого боку, фінансування енергозбереження з боку державного бюджету, як і залучення для цих цілей позикових коштів, також є вкрай недостатнім для досягнення значних результатів.

Суттєво ускладнює ситуацію недосконалість українського законодавства, яке, зокрема, не дозволяє залучати для цілей енергозбереження кошти, отримані в результаті економії витрат на паливно-енергетичні ресурси, досягнутої за рахунок уже впроваджених енергозберігаючих заходів.

Питання енергозбереження є актуальним на сьогоднішній день і залишатиметься таким у майбутньому. Потрібно покращувати існуючі методики, а також шукати нові способи його вирішення не лише на загальнодержавному рівні, але й на рівні кожного окремого виробництва, кожної окремого технологічного процесу. Енергозбереження має стати важливим для керівників усіх галузей промисловості, оскільки воно дозволить заощаджувати величезні кошти, що витрачаються на марні витрати енергії на виробництві.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконані в роботі дослідження відповідають напряму «Енергетика та енергоефективність» Закону України № 2519-VI від 09.09.2010 р. «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки», стратегічним пріоритетним напрямом інноваційної діяльності в Україні на 2003-2013 роки «Новітні ресурсозберігаючі технології» Закону України № 433-IV від 16.01.2003 р. «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», Комплексній програмі НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» «Енергетика сталого розвитку» і направленості тематики НДР кафедри електропостачання НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського».

**Метою магістерської дисертації** є удосконалення методики побудови систем оперативного контролю енергоефективності на підприємстві, що дозволяла створювати такі системи з мінімальними витратами часу і контролювати ефективність енергоспоживання технологічних об'єктів з оптимальною періодичністю.

Для досягнення зазначеної мети дослідження були вирішені наступні завдання:

— проаналізовано методи планування та контролю обсягів енергоспоживання на підприємствах;

- розроблено алгоритм скорочення часу, необхідного для побудови систем оперативного контролю і планування енергоспоживання;
- запропоновано методику визначення оптимального періоду контролю ефективності енергоспоживання для технологічних об'єктів;
- проаналізовано методику відбору експертним шляхом основних факторів, які необхідно враховувати при встановленні планових змінних в системах оперативного контролю і планування енергоспоживання;
- обрано прийнятний метод побудови багатфакторних математичних моделей, необхідних для встановлення «стандартів» енергоспоживання в системах оперативного контролю.

**Об'єктом дослідження** є процес аналізу, планування та оперативного контролю обсягів споживання електричної енергії на підприємстві.

**Предметом дослідження** є методи та алгоритми аналізу, планування та оперативного контролю обсягів енергоспоживання на підприємстві.

**Методи дослідження.** В роботі використовувались теоретичні методи та експериментальні дослідження, такі як: статистичні методи моделювання; методи фінансової оцінки проектів; методи планування процесів; методи аналізу математичних моделей.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному: у розробленні алгоритму скорочення часу, потрібного для збирання даних, необхідних для побудови систем оперативного контролю і планування енергоспоживання технологічних об'єктів. Запропонований алгоритм скорочення тривалості побудови таких систем для технологічних об'єктів базується на попередньому встановленні «стандартів» енергоспоживання для мінімальної періодичності контролю, яка дорівнює одній годині, що дає можливість вже через одну або кілька діб після початку збирання вихідних даних здійснювати контроль ефективності використання палива або енергії на об'єкті, що розглядається. Окрім того, було запропоновано методику визначення оптимального періоду контролю енергоефективності, найдоцільнішого з технологічної та економічної точки зору інтервалу часу між



двома найближчими перевірками виконання встановленого «стандарту», що визначається за допомогою економічно-фінансового аналізу визначення вартості ймовірних втрат електричної енергії і фінансових витрат на проведення контролю.

**Практичне значення роботи.** Отримані в дисертаційній роботі результати та розроблені пропозиції можуть бути практично використовуватися з метою удосконалення та подальшого розвитку систем оперативного контролю та планування енергоспоживання технологічних об'єктів в Україні.

**Апробація результатів роботи.** Результати магістерської дисертації були обговоренні на практичних заняттях з курсу: «Науково-дослідна робота за темою магістерської дисертації» та X Міжнародній науково-технічній конференції «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА» від 27.04.2018 р., Інститут енергозбереження та енергоменеджменту, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Публікації.** За результатами досліджень було опубліковано одну тезу доповіді на X Міжнародної науково-технічної конференції «ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА».

Для виконання розрахунків у розділі 3 магістерської дисертації використовувалось наступне програмне забезпечення: STATISTICA; MS Excel.

## РОЗДІЛ 1 ОЦІНКА ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯ НА ОСНОВІ ПОБУДОВИ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

### 1.1 Основні принципи побудови традиційних систем контролю енергоспоживання

Будь-яке підприємство, організація чи установа тією чи іншою мірою зацікавлена у вирішенні питань енергозбереження, тобто у підвищенні ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР). Щоб дізнатися, наскільки велике значення на тому чи іншому підприємстві приділяється цій проблемі, достатньо відповісти на два питання:

1) чи ведеться на підприємстві контроль витрат на оплату за споживання паливно-енергетичних ресурсів?

2) хто здійснює оплату за споживання паливно-енергетичних ресурсів?

У залежності від відповіді на перше з цих питань, можна виділити 5 рівнів зацікавленості підприємства, організації чи установи у вирішенні проблеми енергозбереження [1].

**Перший рівень:** підприємство просто сплачує рахунки за споживання палива та енергії (зацікавленість у вирішенні проблеми енергозбереження відсутня).

**Другий рівень:** перш ніж здійснювати оплату, рахунки за паливо та енергію порівнюють з даними лічильників комерційного обліку з метою перевірки правильності фінансових витрат за споживання ПЕР.

**Третій рівень:** крім перевірки правильності витрат, показання лічильників комерційного обліку співставляють з обсягом виробництва продукції (виконання роботи), тобто визначаються показники питомої витрати палива та енергії на підприємстві (є зацікавленість в оцінюванні ефективності споживання ПЕР).

**Четвертий рівень:** на підприємстві усвідомлюють необхідність організації технічного обліку палива та енергії. На базі даних технічного обліку додатково визначаються показники питомої витрати ПЕР для всіх підрозділів підприємства, а

також для основних споживачів палива та енергії (є зацікавленість не тільки у визначенні, але й у аналізі ефективності використання ПЕР на підприємстві).

**П'ятий рівень:** підприємство переходить до створення та використання систем оперативного контролю енергоспоживання, які є складовою системи енергетичного менеджменту (тобто є зацікавленість у визначенні, систематичному контролі та управлінні ефективністю використання ПЕР на підприємстві) [1, 2].

Однак, чи буде контроль та управління ефективністю енергоспоживання достатньо дієвим, значною мірою залежить від того, де саме здійснюватиметься цей контроль, і хто буде платити за споживання палива та енергії.

На більшості вітчизняних підприємств ці функції виконує фінансовий підрозділ (бухгалтерія), або, у кращому разі, енергетичний підрозділ (відділ чи служба головного енергетика). Очевидно, що у першому випадку контроль ефективності використання ПЕР взагалі відсутній, а у другому – здійснюється частково (в основному у сфері виробництва, перетворення та розподілу енергії). Однак, управління ефективністю енергоспоживання у кожному з цих випадків практично неможливе.

Найбільш реально управляти ефективністю використання палива та енергії може тільки виробничий персонал. З цієї причини загальні фінансові витрати на оплату за споживання ПЕР найбільш доцільно розподіляти безпосередньо між виробничими підрозділами підприємства. При чому робити це слід на підставі об'єктивних даних технічного обліку споживання палива та енергії.

Очевидно, що управління використанням палива та енергії на будь-якому об'єкті має здійснюватись на підставі результатів контролю ефективності їх використання. Тобто, необхідно не просто систематично контролювати обсяг споживання палива чи енергії і кількість виробленої продукції чи виконаної роботи. Необхідно співставляти одне з іншим [3-7].

Одним із методів співставлення обсягів та результатів енергоспоживання є визначення питомих витрат палива та енергії. Іншим підходом до вирішення цієї проблеми є побудова систем контролю енергоспоживання.

Такі системи контролю енергоспоживання являє собою «інструмент», за допомогою якого може здійснюватись оперативний контроль та управління ефективністю використання будь-якого цінного ресурсу (палива або енергії всіх видів, води, телефонних мереж, фінансових ресурсів тощо) на будь-якому підприємстві. Однак, необхідно розуміти, що сама по собі система контролю не є здатною забезпечити енерго- чи ресурсозбереження, а тільки створює необхідні для цього умови [8, 9].

Велика кількість традиційних систем контролю енергоспоживання була створена у промисловому та комерційному секторі Великобританії наприкінці 90-х років. Створення таких систем контролю фінансувалося Міністерством енергетики цієї держави, яке до цього фінансувало проведення численних енергетичних аудитів у споживачів енергії, але прийшло до висновку, що енергетичний аудит будь-якого об'єкту являє собою «миттєву фотографію» стану справ з енергоспоживання, яка не завжди відповідає дійсності протягом достатньо тривалого часу. Побудова ж і функціонування системи контролю енергоспоживання являє собою свого роду динамічний (систематичний) енергоаудит .[9]

Побудова та функціонування систем контролю енергоспоживання є складовою частиною системи енергетичного менеджменту на будь-якому промисловому чи комерційному об'єкті. На підприємстві, в установі чи організації, як правило, створюється багато систем контролю енергоспоживання, оскільки кожна з них здатна забезпечити контроль та управління ефективністю енерговикористання для порівняно невеликих (локальних) споживачів (підрозділів підприємства, окремих енергоємних агрегатів чи технологічних процесів).

Робота системи оперативного контролю енергоспоживання являє собою циклічний процес виконання наступних основних функцій [9]:

- облік споживання палива або енергії;
- облік результатів енергоспоживання (виробництва продукції, виконання роботи), а також параметрів технологічного процесу та умов виробництва;

- визначення так званих планових змінних, тобто встановлення планового рівня ефективності енергоспоживання («стандартів» споживання палива або енергії);
- контроль та аналіз виконання раніше встановлених «стандартів» енергоспоживання;
- планування та здійснення заходів, необхідних для підтримання запланованого рівня ефективності використання палива чи енергії або для підвищення цього рівня.

Побудова системи оперативного контролю енергоспоживання на будь-якому об'єкті починається зі збору статистичних даних про споживання палива або енергії, обсяги виробництва продукції чи виконання роботи, час роботи агрегатів, параметри технологічного процесу та умови виробництва.

Одержані вихідні дані аналізуються, на підставі чого встановлюється «стандарт» енергоспоживання для об'єкту, що вивчається. Такий «стандарт» необхідно мати для виконання функції контролю ефективності енергоспоживання, тобто для порівняння з ним даних про фактичний обсяг споживання палива чи енергії.

«Стандарт» енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоспоживання являє собою більш чи менш складну математичну модель обсягу споживання палива чи енергії, тобто залежність кількості палива або енергії, що споживається, від одного або кількох факторів, що суттєво впливають на цей процес. Такими факторами можуть бути обсяг виробництва продукції або виконання роботи, тривалість роботи обладнання, окремі параметри технологічного процесу чи виробничих умов тощо. Таким чином, «стандарт» енергоспоживання в системах контролю являє собою деяку «норму» абсолютної (а не питомої) витрати палива чи енергії. Така «норма» не є «ідеальною», як норма питомої витрати палива або енергії, але є добре обгрунтованою, оскільки цілком відповідає конкретному об'єкту, конкретним умовам виробництва тощо. До того ж «стандарт» енергоспоживання встановлюється не у вигляді одного конкретного числового значення, а являє собою

математичну модель, «енергетичну характеристику» об'єкту, для якого його встановлено. Тобто, «стандарт» енергоспоживання є «нормою» витрати палива чи енергії, гнучкою по відношенню до зміни обсягів продукції, параметрів технологічного процесу та умов виробництва [8, 9].

Після встановлення «стандарту» енергоспоживання система оперативного контролю енергоспоживання починає функціонувати. При цьому завдання виробничого персоналу – забезпечити, щоб фактичний обсяг споживання палива чи енергії не перевищував встановленого «стандарту», що свідчить про дотримання запланованого рівня ефективності енерговикористання. Крім того, виробничий персонал забезпечує збір статистичних даних, необхідних для подальшої роботи системи оперативного контролю енергоспоживання.

Контроль виконання встановленого «стандарту» енергоспоживання, тобто контроль ефективності використання палива або енергії на кожному об'єкті здійснюється щотижнево. За результатами контролю керівництву підприємства надається відповідний звіт.

Для забезпечення поступового підвищення ефективності енергоспоживання результати контролю аналізуються і визначаються можливі заходи та шляхи енергозбереження. В цій роботі також приймає участь виробничий персонал об'єкту, на якому функціонує система оперативного контролю енергоспоживання.

Після впровадження відповідних заходів і досягнення стабільного енергозбереження на об'єкті, раніше встановлений «стандарт» енергоспоживання відповідним чином переглядається. Далі процес контролю споживання палива або енергії продовжується. Таким чином, забезпечується підтримання ефективності енергоспоживання на запланованому рівні та поступове підвищення цього рівня. Цей процес за аналогією з нормуванням питомих витрат ПЕР можна назвати поступовою «нормалізацією» споживання палива та енергії.

## **1.2 Встановлення «стандартів» енергоспоживання для традиційних систем контролю енергоспоживання**

Під час розв'язання задач енергозбереження на будь-якому об'єкті, чи то окрема енергоспоживаюча установка або технологічний процес, чи промислове підприємство або комунально-побутова сфера, виникає питання оцінки фактично досягнутого рівня ефективності використання енергії.

Для того, щоб отримати об'єктивну відповідь на дане питання, необхідно оперувати як мінімум двома відповідними показниками. З однієї сторони, необхідно мати деяку кількісну оцінку фактичної реальної ефективності використання енергії на об'єкті, що розглядається, а з іншої сторони, необхідний деякий «еталон», «стандарт», що показує, яким має бути рівень ефективності використання енергії на даному об'єкті у відповідних умовах роботи, і визначається на основі побудованої для даних умов математичної моделі. Але будь-яка математична модель має деяку залишкову помилку опису досліджуваного процесу, яка пов'язана з тим, що модель не враховує впливу всіх факторів на зміну витрати енергії на об'єкті. А інколи залежності енергетичних показників від параметрів технологічного процесу є настільки складними, що змодельовати їх можна лише умовно (тобто знайти функцію, що найкраще описує процес з-поміж усіх інших варіантів характеристик, але не визначає його достатньо чітко). З цієї причини реальні значення енергоспоживання на об'єкті управління, навіть при незмінному рівні ефективності використання енергії, з досить високою ймовірністю можуть перевищувати величину витрати енергії, що визначається відповідним рівнянням регресії. Тобто рівняння регресії витрати енергії на об'єкті управління саме по собі також не може служити досить об'єктивним «еталоном» існуючого рівня ефективності енергоспоживання на будь-якому об'єкті управління [10-13].

Тому при побудові будь-якої моделі регресії, формується верхня і нижня межа відхилень від рівняння характеристики. Ці відхилення і визначаються похибкою змодельованого процесу енергоспоживання, а також новими параметрами, що впливають на цей процес протягом наступних періодів часу, для яких проводиться

розрахунок. Ці межі визначатимуть область допустимих значень фактичного показника енергоспоживання для даних періодів часу. Довірчі інтервали будуть встановлюватися для індивідуальних значень виходу математичної моделі у тому випадку, якщо процес моделюється для такого ж за тривалістю періоду часу, на основі якого його було змодельовано (наприклад, якщо визначено модель на основі значень для одного тижня і потрібно знайти планові показники для наступного тижня). Якщо ж потрібно визначити показники енергоспоживання для більш тривалих періодів часу, ніж ті, на основі яких було змодельовано процес (наприклад, з тижня на місяць), то будуть застосовані формули вже для середніх значень виходу математичної моделі. Вони визначатимуть більш вузьких діапазон показників енергоспоживання, ніж довірчі інтервали індивідуальних значень.

«Стандарт» споживання енергії, тобто величину, що визначатиме планове енергоспоживання для періодів часу, що нас цікавлять, необхідно встановлювати у вигляді верхньої межі довірчого інтервалу для відповідної енергетичної характеристики [14].

Встановлення «стандартів» енергоспоживання для систем контролю ефективності використання енергії може здійснюватися трьома наступними методами [9]:

- встановлення «стандартів» витрати енергії у вигляді константи;
- встановлення «стандартів» енергоспоживання на основі рівняння лінійної однофакторної регресії;
- встановлення «стандартів» енергоспоживання на основі рівнянь лінійної багатofакторної регресії.

Завдання встановлення довірчих інтервалів вирішується найпростіше тоді, коли необхідно встановити «стандарт» енергоспоживання у вигляді постійної величини допустимої витрати енергії. У цьому випадку, як правило, немає можливості побудувати будь-яку математичну модель процесу енергоспоживання, оскільки відсутні або невідомі чинники, що істотно впливають на даний процес (або з якихось причин неможливо реєструвати значення цих факторів).



З цієї причини відповідний «стандарт» споживання енергії встановлюється виключно на підставі наявних статистичних даних про фактичні витрати енергії на об'єкті управління, які розглядаються просто як деяка випадкова величина. Для цієї випадкової величини за наявною вибіркою даних на основі відомих формул можуть бути визначені оцінки її основних статистичних характеристик: середнє значення витрати енергії  $E_{sered}$  і дисперсія фактичних витрат енергії  $D$  відносно їх середнього значення.

Маючи у своєму розпорядженні зазначені статистичні характеристики, можна визначити деяку максимальну величину витрати енергії  $E_{max}$ , яку із заданою ймовірністю  $p$  не будуть перевищувати фактичні значення енергоспоживання, які можуть мати місце (і є допустимими) при існуючому рівні ефективності використання енергії на розглянутому об'єкті управління. Величина  $E_{max}$  являє собою верхню межу довірчого інтервалу для фактичних значень витрати енергії, яка встановлюється за формулою:

$$E_{max} = E_{sered} + K * \sigma, \quad (1.1)$$

де  $\sigma$  - середньоквадратичне відхилення фактичних значень енергоспоживання від їх середньої величини (корінь квадратний з дисперсії). Чисельне значення коефіцієнту  $K$  у формулі залежить від заданої ймовірності  $p$  того, що фактичні значення енергоспоживання на об'єкті управління не будуть перевищувати величину  $E_{max}$ . Для визначення значення коефіцієнту  $K$  необхідно знати закон розподілу відповідної випадкової величини (у нашому випадку, фактичних витрат енергії на об'єкті, що вивчається). Оскільки цей закон розподілу, як правило, невідомий, для визначення чисельних значень коефіцієнту  $K$  можна скористатися нерівністю Чебишева:

$$p(|E_f - E_{sered}| < K * \sigma) > 1 - \frac{1}{K^2},$$

де  $p(|E_f - E_{sered}| < K * \sigma)$  - ймовірність того, що відхилення деякого фактичного значення енергоспоживання  $E_f$  на об'єкті управління від середньої величини витрати енергії  $E_{sered}$  буде менше половини ширини відповідного довірчого інтервалу.

Таким чином, величина  $E_{max}$  може бути використана у якості «стандарту» енергоспоживання, який у даному випадку встановлюється у вигляді деякої постійної величини витрати енергії (у вигляді деякої константи).

Однак, потрібно мати на увазі, що довірчий інтервал, який визначається таким чином, при достатньо високій заданій ймовірності  $p$ , зазвичай виявляється дуже широким, у силу повної невизначеності, випадковості можливих змін витрати енергії на даному об'єкті. Тому встановлення «стандартів» енергоспоживання у вигляді константи зазвичай виявляється недоцільним, оскільки фактична витрата енергії на об'єкті управління, навіть при доволі значних коливаннях ефективності її використання, у край рідко буде перевищувати допустиму його величину  $E_{max}$ , визначену цим «стандартом» [14].

Таким чином, «стандарти» енергоспоживання, встановлені у вигляді константи, не дозволяють у достатній мірі мобілізувати персонал об'єкта управління на підтримання ефективності використання енергії на стабільному рівні.

Встановлення «стандартів» енергоспоживання на основі рівняння лінійної однофакторної регресії здійснюється тоді, коли для об'єктів управління ефективністю енерговикористання (особливо для окремих агрегатів або технологічних процесів) вдається виявити (або зареєструвати) всього один, найважливіший фактор, який надає найбільш сильний вплив на витрату енергії на об'єкті. Як правило, це може бути показник кількості випущеної продукції або виконаної роботи, або один з параметрів, що характеризує виробничий процес чи умови його протікання. У цьому випадку «стандарт» енергоспоживання може бути встановлений на основі деякої однофакторної математичної моделі (наприклад, рівняння лінійної регресії) витрат енергії на досліджуваному об'єкті в залежності від

значень цього чинника. Методика побудови лінійних однофакторних регресійних моделей добре відома, і приводити її опис немає необхідності. «Стандарт» споживання енергії в даному випадку необхідно встановлювати у вигляді верхньої межі довірчого інтервалу, визначеної для відповідного рівняння витрати енергії.

Для індивідуальних значень виходу наявної математичної моделі може бути побудований довірчий інтервал, який в даному випадку буде мати змінну ширину, оскільки визначається в залежності від двох параметрів:

- від залишкової похибки опису фактичних значень енергоспоживання за допомогою наявного рівняння регресії;
- від координат індивідуального значення виходу моделі, для якої будується довірчий інтервал.

Встановлення довірчого інтервалу для індивідуальних значень виходу деякої математичної моделі, навіть для однофакторної лінійної регресії, являє собою вже більш складну задачу, ніж побудова довірчого інтервалу для вибірки значень деякої випадкової величини. Нехай відомо деяке рівняння лінійної регресії витрати енергії на об'єкті управління в залежності від значень певного визначального фактора  $X$ , яке в загальному вигляді можна записати як:

$$E_{\text{mod}} = A + B * X,$$

де  $E_{\text{mod}}$  - значення витрати енергії, одержувані на підставі даного рівняння регресії;  $A$  і  $B$  - параметри (константи) рівняння регресії.

Таким чином, згідно з наступною формулою, верхня межа довірчого інтервалу для індивідуального значення витрати енергії з координатою  $X(p)$ , отриманого на основі рівняння однофакторної лінійної регресії, може бути визначена за наступною формулою [10]:

$$E_{\text{max}}(p) = E_{\text{mod}}(p) + T(\alpha/2, f_e) * S_e * \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(X_{\text{ser}} - X(p))^2}{N * D(X)}} \quad (1.2)$$

де  $T(\alpha/2, f_e)$  - квантиль розподілу Стюдента при двосторонній вірогідності  $\alpha$  та числі степенів свободи  $f_e$ ;  $S_e$  - відповідне середньоквадратичне відхилення

індивідуальних значень фактичних витрат енергії від результатів їх моделювання за допомогою відповідного рівняння регресії;  $N$  - число експериментальних даних у виборці, використаній для побудови рівняння регресії;  $X_{ser}$  та  $X(p)$  - відповідно середнє та деяке поточне значення фактора, що впливає на витрату енергії на об'єкті управління;  $D(X)$  - вибіркова дисперсія індивідуальних значень вказаного фактора  $X$ .

Крива  $E_{\max}(p) = f(X(p))$  являє собою деяку параболу і є верхньою границею довірчого інтервалу, встановленого для відповідного рівняння лінійної однофакторної регресії витрати енергії в залежності від значень фактора  $X$ .

Ця крива з деякою заданою ймовірністю  $\alpha$  визначає собою максимально допустимі значення фактичних витрат енергії на об'єкті управління при існуючому рівні ефективності її використання. Тому зазначена верхня межа довірчого інтервалу цілком може бути використана в якості відповідного «стандарту» енергоспоживання.

Проте, потрібно брати до уваги, що довірчий інтервал, який визначається подібним чином для відповідного рівняння лінійної однофакторної регресії, при досить високій заданій ймовірності  $\alpha$  також може виявитися досить широким, з огляду на те, що вказане рівняння регресії дозволяє враховувати вплив на процес споживання енергії лише одного фактора у той час, як величина витрат енергії на об'єкті управління може істотно змінюватися під впливом багатьох факторів. У цьому випадку встановлення «стандартів» енергоспоживання у вигляді верхньої межі довірчого інтервалу, що визначається для деякого рівняння лінійної регресії, часто також може виявитися недоцільним, оскільки фактичні витрати енергії на об'єкті управління, навіть при досить значних коливаннях ефективності її використання, досить рідко будуть перевищувати допустиму величину, визначену таким «стандартом». Таким чином, «стандарти» енергоспоживання, встановлені у вигляді верхньої межі довірчого інтервалу, що визначаються для деякого рівняння лінійної регресії, також можуть виявитися недостатньо об'єктивним критерієм

підтримання ефективності використання енергії на досить стабільному рівні для персонала на даному об'єкті.

Встановлення «стандартів» енергоспоживання на основі рівнянь лінійної багатofакторної регресії здійснюється для більшості реальних об'єктів управління ефективністю використання енергії (особливо, виробничих), де на величину витрат енергії впливають численні й різноманітні фактори. Це, перш за все, показники, що характеризують результати і умови протікання виробничого процесу (наприклад, обсяг виготовленої продукції або виконаної роботи, число годин роботи основного обладнання, тиск, температура, швидкість та інші характеристики технологічного процесу, параметри кліматичних умов і т.п.).

У цьому випадку «стандарт» енергоспоживання на даному об'єкті повинен встановлюватися на основі деякої багатofакторної математичної моделі процесу енергоспоживання. Зокрема, найбільш просто така математична модель може бути побудована у вигляді рівняння багатofакторної лінійної регресії. Методика побудови таких рівнянь регресії являє собою досить складну процедуру, особливо якщо число факторів у моделі більше трьох [9, 10].

Будь-яка багатofакторна математична модель, побудована з використанням певного математичного методу, також має певну залишкову похибку опису модельованого процесу. Тому і в даному випадку також є достатньо велика вірогідність того, що фактичні значення витрати енергії на об'єкті управління виявляться більшими, ніж величини енергоспоживання, що визначаються на основі відповідної математичної моделі. Тобто, будь-яка багатofакторна математична модель, зокрема, рівняння багатofакторної лінійної регресії витрати енергії, сама по собі не може служити досить об'єктивним «еталоном» ефективності енергоспоживання на деякому об'єкті управління.

У зв'язку із зазначеною обставиною, у разі використання багатofакторних математичних моделей, «стандарт» споживання енергії також необхідно встановлювати у вигляді верхньої межі довірчого інтервалу, визначеного для відповідної моделі. Побудова довірчого інтервалу для індивідуальних значень

виходу деякої багатфакторної математичної моделі являє собою вже досить складне завдання. Нехай відома деяка математична модель, наприклад, рівняння лінійної багатфакторної регресії витрати енергії на об'єкті управління, в залежності від значень ряду факторів  $X_1, \dots, X_n$ , що впливають на нього, яке в загальному вигляді можна записати як:

$$E_{\text{mod}} = A + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_n X_n$$

де  $E_{\text{mod}}$  - значення витрат енергії, отримані на основі даного рівняння регресії;

$A, B_1, B_2, \dots, B_n$  - параметри (константи) рівняння багатфакторної лінійної регресії.

Для індивідуальних значень виходу даної математичної моделі можна побудувати відповідний довірчий інтервал за формулою [14]:

$$E_{\text{max}}(p) = E_{\text{mod}}(p) \pm T\left(\frac{\alpha}{2}, f_e\right) \cdot S_e \cdot \sqrt{1 + [X^T(p)][D][X(p)]}, \quad (1.3)$$

де  $[X(p)]$  - матриця значень незалежних змінних (факторів), які використовуються у математичній моделі;

$[X^T(p)]$  - транспонована матриця  $[X(p)]$ ;

$[D]$  - коваріаційно-дисперсійна матриця вектора параметрів (констант) рівняння математичної моделі;

Інші параметри, що фігурують в залежності (1.3) аналогічні тим, що використовуються в рівнянні (1.2).

Рівняння багатфакторної регресії найбільш точно описують процес енергоспоживання, якщо правильно враховано взаємний вплив факторів на цільову функцію (проведено відсів факторів, що мають тісний взаємозв'язок один з одним, або наявність яких у моделі послаблює вплив інших, більш «значимих» факторів і т.д.) Звичайно, при побудові багатфакторної моделі також існуватиме похибка, оскільки жодна модель не може ідеально відобразити реальну залежність величин.

### **1.3 Недоліки існуючої методики побудови систем оперативного контролю енергоспоживання**

Системи оперативного контролю енергоспоживання викликають практичний інтерес перш за все з точки зору можливості оперативного контролю ефективності енергоспоживання, а також як можливість об'єктивної оцінки загального технічного стану енергоустановок на об'єктах. Вони є досить простими і не потребують великих витрат часу на організацію контролю.

Разом із тим, класичні системи контролю і оперативного планування енергоспоживання мають у теоретичному відношенні цілий ряд суттєвих недоліків, спрощень, невирішених питань, які не дозволяють у повній мірі використовувати закладений в них принцип контролю і, відповідно, досягати найкращих результатів від їх використання. Розглянемо дані недоліки більш детально.

Як було зазначено вище, у традиційних системах контролю «стандарти» енергоспоживання встановлюються, як правило, у вигляді [9, 10]:

- деякої константи, тобто постійної максимально допустимої величини витрат енергії на досліджуваному об'єкті;
- рівняння однофакторної лінійної регресії між витратами енергії на об'єкті і значеннями деякого фактора, який найбільш суттєво впливає на величину цих витрат;
- рівняння багатфакторної лінійної регресії між витратами енергії на об'єкті та значеннями декількох факторів, що визначають величину енергоспоживання на об'єкті (практично враховується вплив двох-трьох факторів).

Такі «стандарти» є занадто простими, оскільки в реальних умовах на процес енергоспоживання на об'єктах суттєво впливають численні та різноманітні фактори (рис.1.1), причому характер впливу багатьох із них на витрати енергії часто є нелінійним.

Таким чином, якщо у математичній моделі енергоспоживання не врахувати усіх істотно впливаючих на вихідну функцію факторів, то існує значна ймовірність того, що зміна модельованого процесу може бути викликана фактором, який не

враховано. Це призводить до невідповідності побудованої математичної моделі реальному процесу [14].

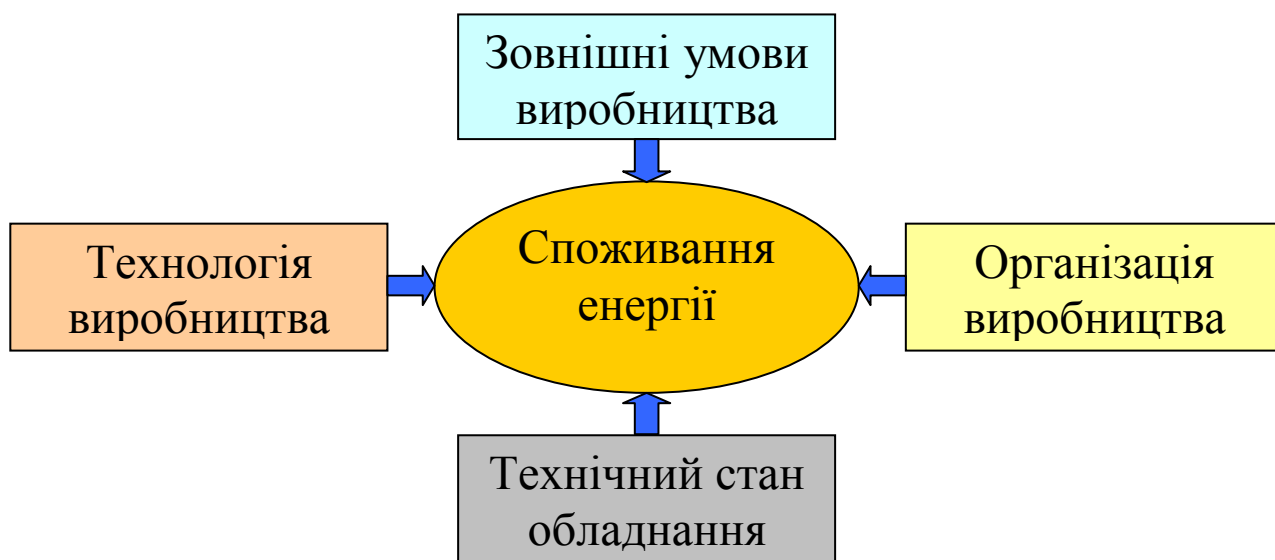


Рисунок 1.1 – Фактори, які впливають на енергоспоживання виробничих об'єктів

Як уже було зазначено, встановлений «стандарт» енергоспоживання у системах оперативного контролю енергоспоживання являє собою математичну модель цього процесу. А будь-яка математична модель завжди має залишкову похибку моделювання, яка не враховується при створенні систем оперативного контролю енергоспоживання. Разом із тим, існують статистичні методи, які дозволяють врахувати цю похибку і побудувати більш коректний у математичному плані «стандарт» енергоспоживання. Встановлення обґрунтованого «стандарту» споживання енергії є одним із ключових завдань, рішення яких пропонується у даній роботі.

Як відомо, функціонування систем оперативного контролю енергоспоживання після встановлення «стандарту» споживання енергії, перш за все, полягає у періодичному контролі його виконання. У діючих методиках створення і функціонування систем контролю відсутнє визначення періоду контролю



(управління)  $T_{kontr}$  - інтервалу часу між двома найближчими перевірками виконання встановленого «стандарту».

Сьогодні у системах контролю і оперативного планування енергоспоживання величина періоду управління задається без належного обґрунтування і складає, як правило, від тижня до місяця. Разом із тим, від значення  $T_{kontr}$  залежать як загальні витрати на проведення контролю, так і ефективність роботи системи, оперативність управління енергоспоживанням, які є важливими характеристиками подібних систем. Саме тому вибір даного інтервалу часу повинен проводитися на підставі чітких та однозначних кількісних розрахунків.

Наступним істотним недоліком діючих систем оперативного контролю енергоспоживання є практична відсутність об'єктивної методики контролю виконання встановлених «стандартів» енергоспоживання. Відомий метод кумулятивних сум дає можливість лише за допомогою візуального спостереження відхилень фактичних рівнів споживання енергії від «стандартних» відслідковувати динаміку зміни рівнів енергоспоживання, але він не дає відповіді на питання, якого характеру (випадкового чи не випадкового) дані зміни. Тим часом, необхідним є створення методики виявлення ознак не випадкового скорочення чи збільшення обсягів енергоспоживання на об'єкті дослідження, обумовленого загальними тенденціями зміни ефективності використання ПЕР. Тільки на основі такої методики можна констатувати покращення чи погіршення енергоефективності на об'єкті управління.

До недоліків існуючих методик створення систем оперативного контролю енергоспоживання слід віднести також наступні:

- відсутність економічного стимулювання підтримки та підвищення рівня ефективності енерговикористання;
- «індивідуальність» даних систем, тобто відсутність можливості порівняння між собою рівнів енергоефективності подібних об'єктів.

Отже, зазначені недоліки, які характерні для систем оперативного контролю енергоспоживання, не дозволяють вважати діючі методики їх побудови і функціонування у достатній мірі об'єктивними та обґрунтованими. Тому існує необхідність в урахуванні вказаних недоліків при розробці нової, більш досконалої методики створення подібних систем.

### **Висновки до розділу 1**

1. Управління використанням палива та енергії на будь-якому об'єкті має здійснюватись на підставі результатів контролю енергоефективності їх споживання. Тобто, необхідно не просто систематично контролювати обсяг споживання палива чи енергії і кількість виробленої продукції чи виконаної роботи. Необхідно співставляти одне з іншим. Одним із методів співставлення обсягів та результатів енергоспоживання є визначення питомих витрат палива та енергії. Іншим підходом до вирішення цієї проблеми є побудова систем оперативного контролю енергоспоживання.

2. Системи контролю і планування енергоспоживання являють собою «інструмент», за допомогою якого може здійснюватись оперативний контроль та управління ефективністю використання будь-якого цінного ресурсу (палива або енергії всіх видів, води, телефонних мереж, фінансових ресурсів тощо) на будь-якому підприємстві.

3. Побудова та функціонування систем контролю енергоспоживання є складовою частиною системи енергетичного менеджменту на будь-якому промисловому чи комерційному об'єкті.

4. В основі побудови систем контролю енергоспоживання є встановлення «стандартів», що являють собою математичну модель, яка описує залежність споживання енергетичних ресурсів від чинників, що найбільш суттєво впливають на обсяги енергоспоживання. Встановлення «стандартів» енергоспоживання для систем контролю ефективності використання енергії може бути у вигляді константи,

на основі рівнянь лінійної однофакторної регресії або лінійної багатофакторної регресії.

5. Традиційні системи контролю і планування енергоспоживання мають певні недоліки, які потребують подальшого удосконалення, що буде розглянуто в даній роботі.

## **РОЗДІЛ 2 РОЗВИТОК ПРИНЦИПОВИХ ПІДХОДІВ ДО ПОБУДОВИ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ**

Вирішення існуючих проблем, що виникають при побудові традиційних систем контролю і планування, розпочнемо із формування наступного завдання: яким же чином можна, маючи певну мінімальну кількість даних, отримати їх можливі значення для більш тривалого періоду часу, в залежності від конкретних умов виробництва? Адже значні витрати часу, необхідні для попереднього збору вихідних даних при побудові систем контролю, є ще одним невирішеним питанням. Проблема ця з теоретичної точки зору може здатись несуттєвою, однак її розв'язання є принципово важливим для практичного використання подібних систем контролю на вітчизняних підприємствах. Приймаючи до уваги, що в зарубіжній практиці для створення кожної локальної системи контролю і планування витрачається 10-15 тижнів, а також той факт, що на реальних виробничо-господарських об'єктах є необхідність у побудові десятків таких систем, можна очікувати, що без вирішення проблеми, що розглядається, перехід до застосування концепції оперативного контролю і планування енергоспоживання на будь-якому підприємстві триватиме роками, що є абсолютно неприйнятним [9-13].

### **2.1 Скорочення витрат часу на побудову систем оперативного енергоспоживання технологічних об'єктів**

Методологію скорочення тривалості побудови систем оперативного контролю енергоспоживання можна продемонструвати на прикладі деякого технологічного об'єкту (агрегату, установки чи технологічного процесу), який споживає електричну енергію.

Відомо, що в традиційних системах контроль ефективності енерговикористання, здебільшого, здійснюється безпосередньо на підставі планування та обліку витрат ПЕР за відповідний період. Однак очевидно, що контролювати

енергоефективність будь-якого об'єкту можна також і за іншими показниками, наприклад, за споживанням потужності або питомою витратою палива чи енергії.

При виборі показника, за яким необхідно контролювати ефективність енерговикористання деякого технологічного об'єкту, з багатьох міркувань перевагу можна віддати споживанню потужності, оскільки застосування цього показника дає можливість дещо простіше враховувати режими роботи агрегату чи установки, що розглядається, при плануванні і контролі енергоефективності. Крім того, як буде показано далі, використання саме цього показника є доцільним з точки зору скорочення часу, необхідного для побудови локальної системи контролю і планування на будь-якому технологічному об'єкті.

Очевидно, що збір вихідних даних, потрібних для створення системи контролю і планування енергоспоживання, необхідно здійснювати з тією ж періодичністю, з якою у подальшому буде здійснюватися контроль енергоефективності. З практичної точки зору можна стверджувати, що найкоротшим періодом часу, для якого може бути доцільним виконання контролю ефективності використання палива чи енергії, є одна година.

Попередньо приймаючи, що контроль ефективності енерговикористання на технологічному об'єкті, що розглядається, буде здійснюватись саме з такою періодичністю, за допомогою існуючих чи тимчасово встановлених приладів обліку можна з інтервалом в одну або декілька годин зареєструвати потужність, що споживається агрегатом, його продуктивність, основні параметри технологічного процесу та умов виробництва. В цьому випадку час, необхідний для збору вихідних даних, обсяг яких буде достатнім для побудови систем контролю на цьому об'єкті, не перевищуватиме однієї або кількох діб, що з практичної точки зору є цілком прийнятним.

На основі зібраних щогодинних показників споживання потужності і продуктивності агрегату з використанням відомого розрахунково-статистичного методу [21] може бути побудована одна з основних енергетичних характеристик – залежність потужності ( $P$ ), що споживається агрегатом, від його продуктивності ( $A$ ).

В табл. 2.1 наведені значення електричної потужності та продуктивності деякого технологічного агрегату, зареєстровані з інтервалом в одну годину протягом доби. Припускаючи для спрощення, що енергетична характеристика цього агрегату є прямолінійною, за наявними статистичними даними з використанням методу найменших квадратів можна визначити рівняння цієї залежності, яке в даному випадку має вигляд:  $P=21,8+8,4A$ .

Таблиця 2.1 – Погодинні значення електричної потужності та продуктивності агрегату

№ п/п	$P$ , кВт	$A$ , од.прод. за год.	$P_{\text{розрах}}$ , кВт	$P_{\text{нижн}}$ , кВт	$P_{\text{верх}}$ , кВт
1	152	18	173	136,9	209,1
2	156	18	173	136,9	209,1
3	250	25	231,8	195,1	267,7
4	242	25	231,8	195,1	267,7
5	135	15	147,8	111,6	184
6	120	10	105,8	68,9	142,7
7	160	19	181,4	145,3	217,5
8	40	0	21,8	21,8	61,7
9	250	25	231,8	195,1	267,7
10	246	25	231,8	195,1	267,7
11	250	25	231,8	195,1	267,7
12	138	15	147,8	111,6	184
13	40	0	21,8	21,8	61,7
14	120	9	97,4	60,3	134,5
15	180	21	198,2	162	234,4
16	174	21	198,2	162	234,4
17	254	26	240,2	203,3	277
18	252	26	240,2	203,3	277
19	250	26	240,2	203,3	277
20	245	26	240,2	203,3	277
21	140	15	147,8	111,6	184
22	138	15	147,8	111,6	184
23	112	14	139,4	103	175,7
24	121	14	139,4	103	175,7
Сума	4165	433	4160,4		
Середнє	173,5417	18,04167			

Для одержаної таким чином енергетичної характеристики агрегату, яка являє собою рівняння однофакторної лінійної регресії, за відомою методикою [20] необхідно побудувати відповідний довірчий інтервал.

З цією метою за наведеним вище рівнянням енергетичної характеристики потрібно визначити розрахункові погодинні значення потужності агрегату, значення яких також наведені в табл. 2.1. При цьому межі довірчого інтервалу ( $\hat{P}_{gran}$ ) для фактичних індивідуальних значень електричної потужності, що споживатиметься агрегатом, визначаються за формулою:

$$\hat{P}_{1\_gran} = \hat{P}_{1\_rozr} \pm t\{\alpha/2, f\} s_P \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(A_i - \bar{A}_i)^2}{N s_A^2}}, \quad (2.1)$$

де  $\hat{P}_{rozr}$  - розрахункове значення потужності для відповідної години доби, кВт;  $t\{\alpha/2, f\}$  - квантіль розподілу Стюдента, числове значення якої в даному випадку для числа ступенів свободи  $f=24-1=23$  та рівня статистичної значимості  $\alpha=0,05$  дорівнює 2,07;  $N$  - кількість наявних експериментальних даних;  $s_P$  - стандартне відхилення фактичних величин погодинної потужності від їх розрахункових значень;  $s_A^2$  - дисперсія фактичних значень продуктивності агрегату від її середньої величини.

На підставі даних табл. 2.1  $s_P = 17,1$ ;  $s_A^2 = 60,04$ . Таким чином, межі довірчого інтервалу до енергетичної характеристики агрегату для першої години доби за формулою (2.1) дорівнюють:

$$\hat{P}_{1\_gran} = 173 \pm 36,13 \text{ кВт.}$$

Межі довірчого інтервалу для фактичних погодинних значень потужності агрегату для інших годин доби визначені аналогічним чином і наведені в табл. 2.1.

Побудований довірчий інтервал дозволяє врахувати залишкову похибку результатів моделювання залежності потужності агрегату від його продуктивності, одержаних на підставі відповідного рівняння регресії. Межі цього довірчого

інтервалу у подальшому можна використовувати у якості «стандарту» нормального енергоспоживання для даного технологічного об'єкту.

Таким чином, для агрегату, що розглядається, вже через одну або кілька діб після початку збору вихідних даних з'являється можливість контролювати ефективність використання енергії.

Однак, як вже зазначалося, вихідні дані, зібрані з періодичністю в одну або кілька годин, дозволяють здійснювати у подальшому тільки щогодинний контроль енергоефективності агрегату, що з практичної точки зору у більшості випадків навряд чи є доцільним. Побудувати ж систему оперативного контролю енергоспоживання для більш тривалих періодів (доба, тиждень тощо) безпосередньо з використанням погодинних вихідних даних неможливо.

З іншого боку, на підставі наявної енергетичної характеристики агрегату за відомими значеннями годинної його продуктивності можна визначити потужність, яка споживатиметься цим агрегатом протягом будь-якої години доби при безперервному режимі його роботи. Так само за цією енергетичною характеристикою, знаючи середню продуктивність агрегату за добу можна розрахувати величину середньої електричної потужності, що споживатиметься ним протягом цього періоду [21].

Отже, якщо для агрегату, що розглядається, на декілька наступних діб можна визначити плановий графік його технологічного навантаження (рис. 2.1) і, відповідно, планову середню продуктивність, то, використовуючи побудовану енергетичну характеристику агрегату, для кожної наступної доби можна послідовно встановлювати планові показники середньодобової електричної потужності, наявність яких дозволить контролювати енергетичну ефективність роботи агрегату вже не щогодини, а щодобово.

Наприклад, якщо планове значення середньої продуктивності агрегату на наступну добу дорівнює його середній продуктивності за минулу добу і складає 18,04 одиниць продукції за годину, згідно відомого рівняння енергетичної



характеристики розрахункове значення середньої потужності на наступну добу становитиме:  $P_{doba\_pl} = 21,8 + 8,4 * 18,04 = 173,336$  кВт.

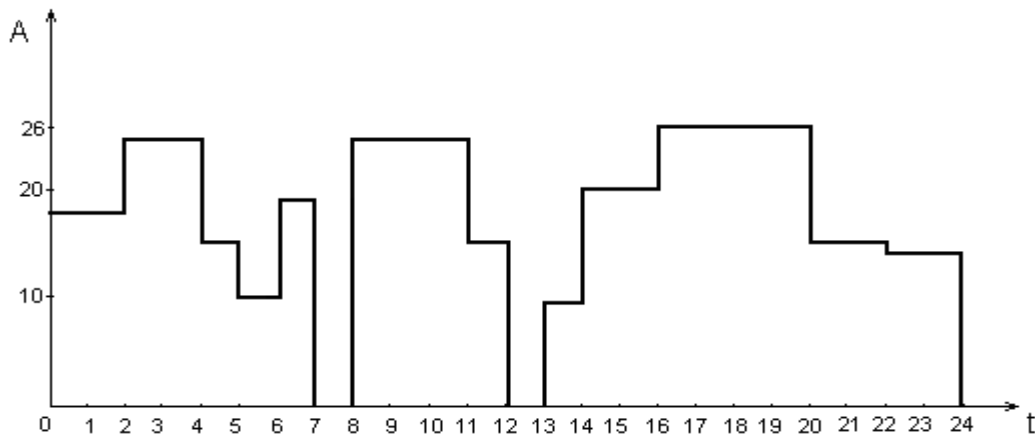


Рисунок 3.1 – Плановий графік технологічного навантаження агрегату на наступну добу

Для одержаного планового значення середньої електричної потужності агрегату на наступну добу також необхідно встановити довірчий інтервал. При цьому, якщо планова середня потужність визначається на підставі її розрахункових погодинних значень, аналогічних наведеним в табл. 2.1, то межі довірчого інтервалу можуть визначатися за формулою, яка застосовується для середніх (у нашому випадку середньодобових) значень виходу відповідної математичної моделі [20]:

$$\hat{P}_{1\_gran} = \hat{P}_{1\_rozr} \pm t\{\alpha/2, f\} \frac{s_P}{\sqrt{N}} \sqrt{1 + \frac{(A_i - \bar{A}_i)^2}{s_A^2}}. \quad (2.2)$$

Параметри, що фігурують в залежності (2.2) аналогічні тим, що використовуються в рівнянні (2.1). Якщо прийняти, що числові значення цих величин дорівнюють вже розрахованим за даними табл. 2.1, то межі довірчого інтервалу для фактичної середньої потужності агрегату на наступну добу дорівнюватимуть:  $\hat{P}_{1\_za\_doby} = 173,336 \pm 7,23$ .

Очевидно, що знайдений таким чином довірчий інтервал для середньодобової потужності агрегату є значно вужчим від області можливих значень його щогодинної потужності. Однак застосовувати формулу (2.2) при встановленні довірчого інтервалу для планових середніх значень потужності на декілька наступних діб можливо тільки у тому випадку, якщо протягом кожної попередньої доби буде продовжуватись збір погодинних даних про роботу агрегату, щодобово коригуватимуться рівняння його енергетичної характеристики і визначатимуться розрахункові значення погодинного навантаження на наступну добу.

Якщо ж планові середні потужності агрегату на кілька наступних діб будуть встановлюватись на підставі його енергетичної характеристики, побудованої за відповідними погодинними даними, зібраними лише за одну добу, визначення меж довірчого інтервалу для середньодобової потужності слід здійснювати з використанням формули (2.1). В цьому випадку довірчий інтервал буде ширшим, але він більш об'єктивно відображатиме область можливих значень фактичної середньодобової потужності агрегату, що розглядається.

Приклад послідовного встановлення планових показників середньодобової потужності, що споживатиметься агрегатом, і відповідного довірчого інтервалу для фактичних значень цього показника наведено на рис. 2.2.

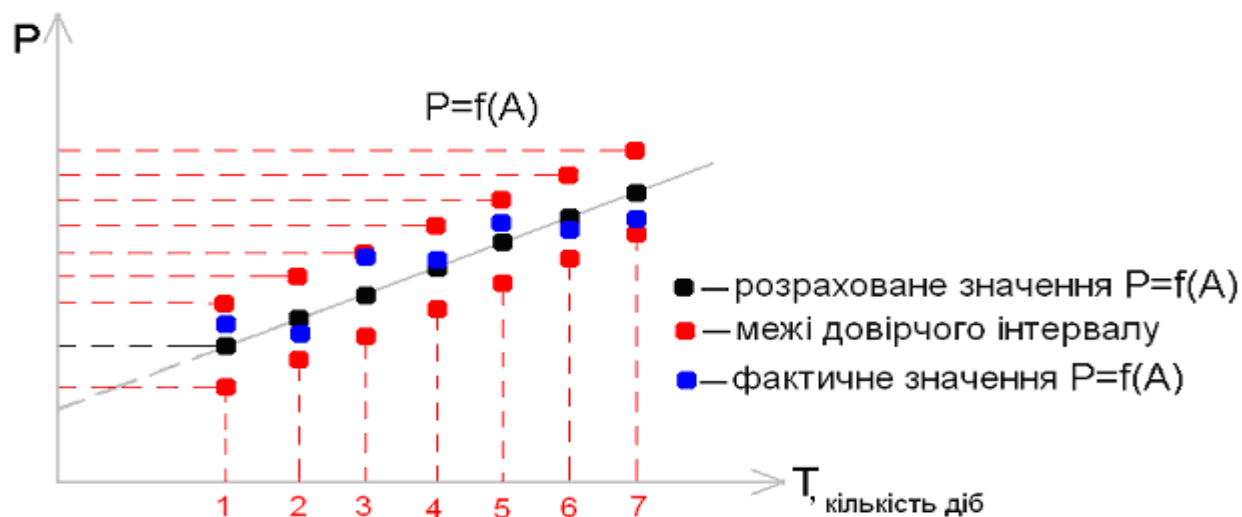


Рисунок 2.2 – Планові показники середньодобової потужності агрегату і довірчі інтервали до них.

Таким чином, ще не маючи «стандарту» добового енергоспоживання (і вихідних даних для його побудови), для технологічного об'єкту, що розглядається, на підставі окремих планових показників середньодобової потужності, що послідовно встановлюються за енергетичною характеристикою його погодинної потужності, вже можна здійснювати щодобовий контроль ефективності використання агрегатом електричної енергії.

Звичайно, встановлені таким чином планові показники середньодобової потужності можуть виявитись не достатньо точними, довірчі інтервали для фактичних їх значень можуть бути досить широкими. Однак, маючи можливість на їх основі щодобово контролювати ефективність енерговикористання, одночасно необхідно реєструвати фактичні значення середньої потужності, що споживається агрегатом протягом кожної доби, його середньодобову продуктивність, основні параметри технологічного процесу та умов виробництва.

У міру появи достатнього обсягу щодобових фактичних даних (рис. 2.2), використовуючи наведені вище розрахунково-статистичні методи, з'являється можливість побудувати енергетичну характеристику агрегату у добовому розрізі, а також визначити для неї межі відповідного довірчого інтервалу, тобто встановити для цього технологічного об'єкту «стандарт» середньодобового споживання електричної потужності.

Наприклад, в табл. 2.2 наведені фактичні показники середньої потужності і середньої продуктивності ( $P$  і  $A$ ) за деякі сім діб.

На підставі наведених в табл. 2.2 фактичних значень середньої електричної потужності та середньої продуктивності технологічного агрегату, що розглядається, зареєстрованих протягом зазначених семи діб, необхідно побудувати нову енергетичну характеристику агрегату, яка відображатиме залежність між відповідними середньодобовими показниками. Припускаючи для спрощення, що добова енергетична характеристика цього агрегату є прямолінійною, з використанням методу найменших квадратів можна визначити рівняння цієї залежності, яке в даному випадку має вигляд:  $P = 249,6 - 3,78A$ .

Таблиця 2.2 – Середньодобові значення електричної потужності  
та продуктивності агрегату

№ п/п	A за добу	A <sub>розр</sub> за добу	P за добу	P <sub>розр</sub> за добу	P <sub>нижн</sub>	P <sub>верх</sub>
1	19	18,04	181,4	177,78	99	256,5
2	22	22	206,6	166,44	89	243,7
3	21	22	198,2	170,22	91,4	249
4	17	15	164,6	185,34	102	268,6
5	16	14	156,2	189,12	105,9	272,4
6	16	16	156,2	189,12	111,8	266,4
7	20	23	189,8	174	83,9	264
Сума	131	130,04	1253	1244,936		
Середнє	18,71	18,57	179	177,848		

Для одержаної добової енергетичної характеристики агрегату, яка являє собою рівняння однофакторної лінійної регресії, також необхідно побудувати довірчий інтервал.

З цією метою за наведеним вище рівнянням енергетичної характеристики потрібно визначити розрахункові середньодобові значення потужності агрегату, які також наведені в табл. 2.2. При цьому межі довірчого інтервалу ( $P_{za\_doby}$ ) для індивідуальних значень середньодобової електричної потужності, що споживатиметься агрегатом, визначаються за формулою (2.2).

На підставі даних табл. 2.2  $s_p = 29,6$ ;  $s_x^2 = 3,15$ . Таким чином, межі довірчого інтервалу до добової енергетичної характеристики агрегату, визначені для першої доби, дорівнюють:  $P_{za\_doby} = 177,78 \pm 78,7$ .

Межі довірчого інтервалу для фактичних середніх значень потужності агрегату для інших шести діб визначені аналогічним чином і наведені в табл. 2.2.

Межі побудованого довірчого інтервалу у подальшому можна використовувати у якості «стандарту» для даного технологічного об'єкту.

Таким чином, після закінчення 5...10 тижнів, протягом яких контроль ефективності використання енергії здійснювався за попередніми плановими показниками середньодобової потужності, для агрегату, що розглядається,

з'являється можливість встановлення більш точного та обґрунтованого «стандарту» добового енергоспоживання, за яким у подальшому має виконуватись контроль енергоефективності цього агрегату.

Однак на підставі цього «стандарту» можна здійснювати тільки щодобовий контроль ефективності енерговикористання. Тим часом як у багатьох випадках для технологічних об'єктів необхідно будувати систему контролю і планування енергоспоживання, яка мала б більш тривалий період контролю, наприклад, тиждень або місяць.

Як було показано вище, зробити це можна на основі «стандарту» енергоспоживання, встановленого на цьому об'єкті для відповідного менш тривалого періоду контролю.

Наприклад, процес переходу від щодобового контролю енергоефективності на деякому локальному об'єкті до щотижневого контролю можна зобразити у вигляді наступного алгоритму, зображеного на рис 2.3.

Таким чином, запропонована методика скорочення тривалості побудови систем контролю енергоспоживання для технологічних об'єктів, що базується на попередньому встановленні «стандартів» енергоспоживання для мінімальної періодичності контролю, яка дорівнює одній годині, дає можливість вже через одну або кілька діб після початку збору вихідних даних здійснювати контроль ефективності використання палива або енергії на об'єкті, що розглядається. Запропонована методика одночасно з контролем енергоефективності, що систематично здійснюється з мінімальною періодичністю, передбачає виконання певної процедури одержання та обробки нових вихідних даних, яка дозволяє поступово, не перериваючи процесу контролю, встановлювати «стандарти» енергоспоживання для більш тривалих періодів (доба, тиждень, місяць тощо).

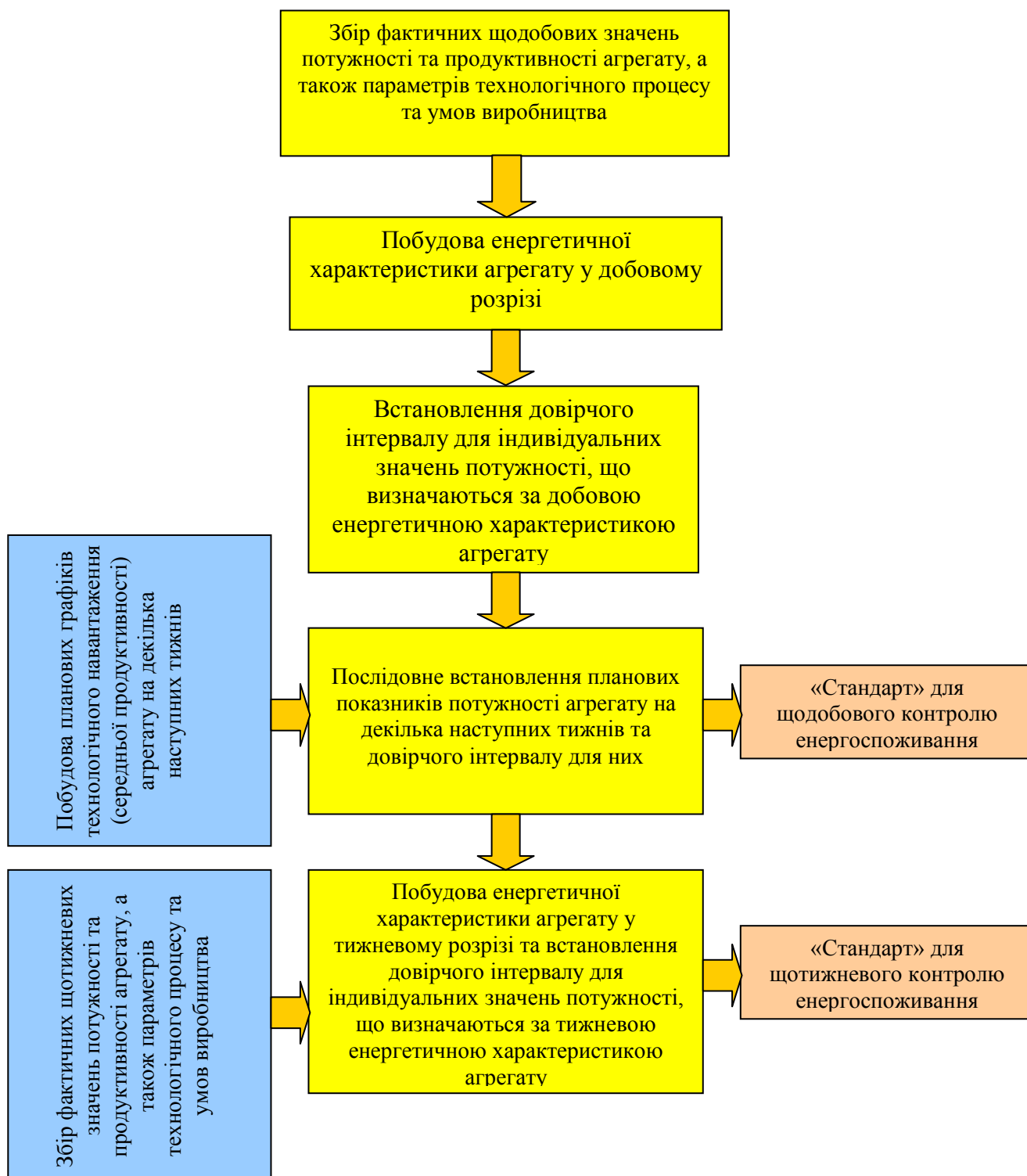


Рисунок 2.3 – Алгоритм переходу від щодобового до щотижневого контролю енергоефективності на деякому локальному об’єкті

Розроблений алгоритм послідовного переходу від меншої до більш тривалої періодичності контролю ефективності енерговикористання суттєво скорочує час, необхідний для створення систем контролю і планування енергоспоживання на будь-якому технологічному об'єкті, а також дає можливість у подальшому визначати для цього об'єкту оптимальний період контролю енергоефективності.

## 2.2 Визначення оптимального періоду контролю енергоефективності із застосуванням систем оперативного контролю

Оптимальним періодом контролю управління  $T_{kontr}$  називається найдоцільніший з технологічної та економічної точки зору інтервал часу між двома найближчими перевірками виконання встановленого «стандарту» [9, 10]. Тобто,  $T_{kontr}$  - це максимально можливий проміжок часу між двома процедурами визначення показників виробничого процесу для встановлення нових «стандартів» енергоспоживання, періодичність здійснення якого дозволяє виконувати дієвий контроль споживання енергії на виробництві і дозволяє максимально економити кошти на його проведення.

Розрахунок оптимального періоду контролю можна провести виходячи з нижченаведеного графіка (рис. 2.4).

1) Побудова кривої вартості ймовірних втрат електричної енергії.

Для знаходження оптимального періоду контролю споживання електричної енергії на господарському об'єкті спершу середню величину відхилень фактичної потужності від розрахованого стандарту за формулою:

$$\Delta \bar{P} = P_{\text{верх}} - P_{\text{факт}} \quad (2.3)$$

Для того, щоб визначити величину вірогідних втрат електричної енергії, знайдемо добуток середнього перевищення потужності на загальну суму

ймовірностей не потрапляння фактичної потужності у проміжки довірчого інтервалу [22]. Суму ймовірностей розрахуємо за формулою:

$$BB = \sum_{i=1}^{n+1} P_{nn.}^m (1 - P_{nn.})^{n-m} \quad (2.4)$$

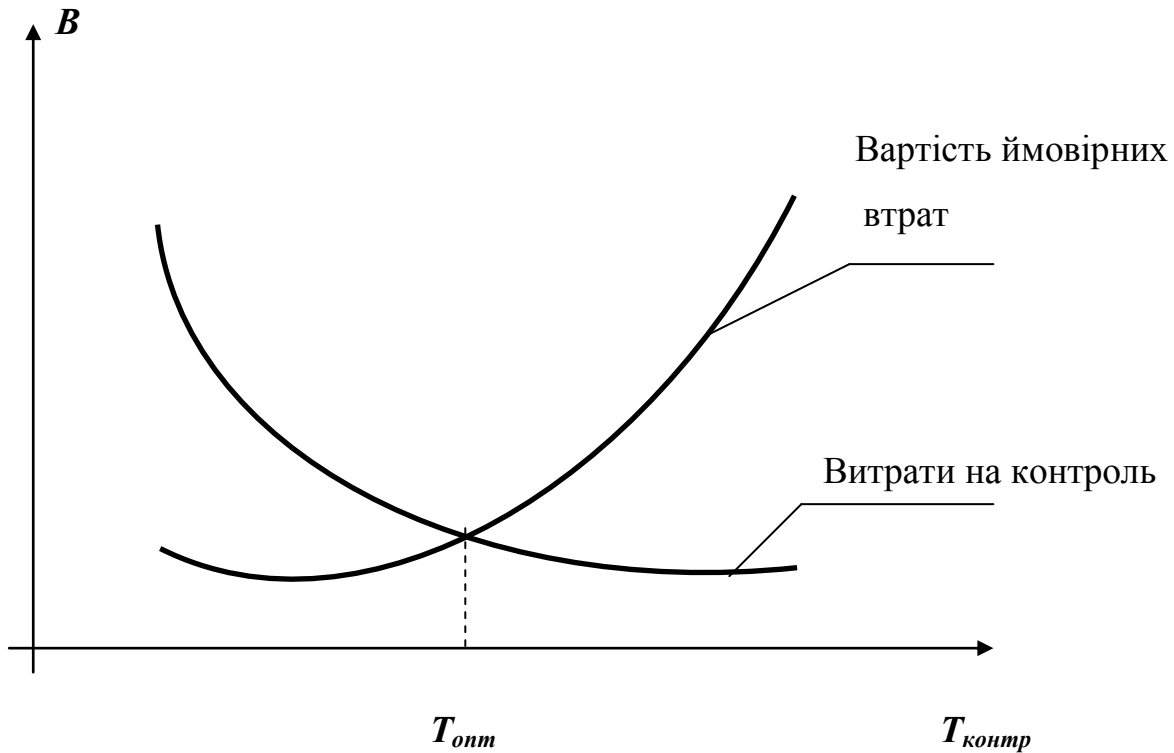


Рисунок 2.4 – Визначення оптимального періоду контролю

Кількість доданків у формулі на одиницю більше кількості змін, оскільки у розрахунок включаються випадки нульової вірогідності перевищень встановлених стандартів потужності.

$$BB_{за\_1змін} = 0,05^1 \cdot 0,95^0 + 0,05^0 \cdot 0,95^1 = 1$$

$$BB_{за\_добу} = 0,05^3 \cdot 0,95^0 + 0,05^2 \cdot 0,95^1 + \dots + 0,05^0 \cdot 0,95^3 = 0,905$$

Аналогічним чином визначаємо ймовірні вірогідності втрат потужності для інших періодів часу:



$$BB_{\text{за}_5\text{дiб}} = 0,817;$$

$$BB_{\text{за}_7\text{дiб}} = 0,737;$$

$$BB_{\text{за}_{10}\text{дiб}} = 0,632;$$

$$BB_{\text{за}_{14}\text{дiб}} = 0,515.$$

Значення вірогідних втрат потужності знайдемо за формулою:

$$ВВП = \Delta \bar{P} \cdot BB \quad (2.5)$$

Розраховані значення зведемо до табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Визначення вартості ймовірних витрат електроенергії  
за відповідні періоди часу

Період розрахунку, $T_{\text{rozr}}$	Середнє перевищення потужності $\Delta \bar{P}$ за $T_{\text{rozr}}$ , кВт	Величина вірогідної втрати електричної енергії $ВВП$ , кВт	Вартість ймовірних втрат за $T_{\text{rozr}}$ , грн
1 зміна (8 годин)	80	80	448
Доба (8*3 годин)	75	67,87	1140
5 діб (8*15 годин)	88	71,9	6040
7 діб (8*21 годин)	83	61,2	7197
10 діб (8*30 годин)	80	50,6	8501
14 діб (8*42 годин)	89	45,8	13080

Вартість ймовірних витрат електричної енергії визначаємо за формулою:

$$B_{\text{йм.вмп}} = \Delta \bar{P} \cdot BB \cdot t \cdot T_{\text{сер.міс}}, \quad (2.6)$$

$BB$  – вірогідна витрата електричної енергії, грн.;

$t$  - кількість годин роботи обладнання;

$T_{\text{сер.міс}}$  – середньомісячний тариф на електричну енергію, грн.

Визначаємо вартість ймовірних витрат (грн.) для кожного періоду  $T_{\text{rozr}}$ :

$$B_{змiна} = 80 \cdot 8 \cdot 0,7 = 448;$$

$$B_{добa} = 67,87 \cdot 24 \cdot 0,7 = 1140;$$

$$B_{5\_дiб} = 71,9 \cdot 24 \cdot 5 \cdot 0,7 = 6040;$$

$$B_{7\_дiб} = 61,2 \cdot 24 \cdot 7 \cdot 0,7 = 7197;$$

$$B_{10\_дiб} = 50,6 \cdot 24 \cdot 10 \cdot 0,7 = 8501;$$

$$B_{14\_дiб} = 45,8 \cdot 24 \cdot 14 \cdot 0,7 = 13080.$$

Значення розрахунків занесемо до табл. 2.3.

Побудуємо криву вартості ймовірних втрат електричної енергії в залежності від часу контролю (рис. 2.5), тобто  $B_{йм.втр} = f(T_{контр})$ .



Рисунок 2.5 – Графік вартості ймовірних витрат електроенергії у часі

## 2) Побудова кривої витрат на проведення контролю.

Використовуємо статистичні дані споживання електричної енергії на господарському об'єкті наведені в табл. 2.1.

Умовно розділимо витрати на проведення контролю споживання електричної енергії на дві складові [10]:

- капітальні витрати на створення системи контролю і планування енерговикористання;
- експлуатаційні витрати.

Розрахуємо капітальні витрати на створення системи контролю і планування енерговикористання.

Для цього знаходимо середньомісячну вартість спожитої електричної енергії за формулою за період, що досліджується, тобто за вісім місяців:

$$B_{\text{серміс}} = W_{\text{серміс}} \cdot T_{\text{серміс}}, \quad (2.7)$$

де  $W_{\text{серміс}}$  – середньомісячне споживання електричної енергії на господарському об'єкті, кВт·год.;

$T_{\text{серміс}}$  – середньомісячний тариф на електричну енергію, грн.

Середньомісячне споживання електричної енергії на господарському об'єкті:

$$W_{\text{серміс}} = \frac{W_1 + W_2 + \dots + W_n}{n},$$

де  $W_1, W_2, \dots, W_n$  – споживання електричної енергії на господарському об'єкті за відповідний місяць, кВт·год.;

$n$  – кількість місяців.

$$W_{\text{серміс}} = 12374,3 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Підставляємо чисельні значення у формулу (2.7) і отримуємо:

$$B_{\text{серміс}} = 8662 \text{ грн.}$$

Можлива економія електричної енергії в результаті створення системи контролю і планування енерговикористання 10 % від вартості електричної енергії за рік, тому капітальні витрати на створення цієї системи будуть складати  $KB_{\text{ств}} = 866 \text{ грн.}$

Для контролю споживання електричної енергії на господарському об'єкті необхідно використовувати прилади для контролю та вимірювання, враховуючи це включаємо вказані витрати у капітальні витрати на створення системи контролю і планування.

На сьогоднішній день вартість приладів для контролю та вимірювання складає 3000 грн.

$$B_{\text{прил}} = 3000 \text{ грн.}$$

Отже, сумарні капітальні витрати на створення системи контролю і планування енерговикористання дорівнюють сумі витрат на створення цієї системи та придбання відповідних приладів [24, 25]:

$$B_{\Sigma} = KB_{\text{ств}} + B_{\text{прил}} \quad (2.8)$$

Підставляємо чисельні значення у формулу (2.8) і отримуємо:

$$B_{\Sigma} = 3866 \text{ грн.}$$

Другою складовою витрат на проведення контролю споживання електричної енергії є експлуатаційні витрати, які включають в себе: аннуїтет, витрати на вимірювання, витрати на збір та обробку даних [24].

Спочатку розрахуємо аннуїтет за формулою:

$$A = B_{\Sigma} \cdot \frac{i(1+i)^{T_{\text{ч.нр}}}}{(1+i)^{T_{\text{ч.нр}}} - 1}, \quad (2.9)$$

де  $B_{\Sigma}$  – сумарні капітальні витрати на створення системи контролю і планування енерговикористання;

$i$  – ставка дисконту;

$T_{\text{ч.нр}}$  – час існування проекту,  $T_{\text{ч.нр}} = 10$  років.

Згідно з даними Національного банку України  $i = 17\%$ .

Підставляємо чисельні значення у формулу (2.9) і отримуємо:

$$A = 1083 \text{ грн.}$$

Для проведення контролю споживання електричної енергії на господарському об'єкті необхідно через деякий час вимірювати, збирати та обробляти дані, які потрібні для визначення ефективності використання електричної енергії. І тому, треба розраховувати витрати на ці роботи.

Витрати на вимірювання даних визначимо за формулою:

$$B_{вим} = T_{вим} \cdot n_{чол} \cdot \overline{ЗП}, \quad (2.10)$$

де  $T_{вим}$  – час вимірювання, потрібний на одне вимірювання;

$\overline{ЗП}$  – середня заробітна плата за 1 годину;

$n_{чол}$  – кількість чоловік.

Приймаємо, що  $T_{вим} = 0,5$  год.,  $n_{чол} = 1$  людина,  $\overline{ЗП} = 10$  грн./год.

Підставляємо чисельні значення у формулу (2.10) і отримуємо:

$$B_{вим} = 5 \text{ грн.}$$

Витрати на збір даних знайдемо за формулою:

$$B_{сб.д} = B_{вим} \cdot \frac{T_{роб.обл.}}{\Delta t_{вим}}, \quad (2.11)$$

де  $T_{роб.обл.}$  – час роботи обладнання за рік;

$\Delta t_{вим}$  – інтервал вимірювання.

Проаналізувавши технологічний процес роботи господарського об'єкту, маємо:  $T_{роб.обл.} = 2500$  год.,  $\Delta t_{вим} = 2$  год.

Витрати на обробку даних визначаємо за формулою:

$$B_{обр.д} = n_{чол} \cdot T_{обр.д} \cdot \overline{ЗП}, \quad (2.12)$$

де  $T_{обр.д}$  – час, необхідний для обробки даних;

$\overline{ЗП}$  – середня заробітна плата за 1 годину;

$n_{чол}$  – кількість чоловік.

Приймаємо, що  $T_{обр.д} = 1$  год.,  $n_{чол} = 1$  людина,  $\overline{ЗП} = 15$  грн./год.

Підставляємо чисельні значення у формулу (2.12) і отримуємо:

$$B_{обр.д} = 15 \text{ грн.}$$

Отже, експлуатаційні витрати на проведення контролю споживання електричної енергії можна представити у вигляді формули:

$$EB = A + B_{вим} \cdot \frac{T_{роб.обл.}}{\Delta t_{вим}} + B_{обр.д} \cdot \frac{T_{роб.обл.}}{T_{контр}}. \quad (2.13)$$

Підставляємо чисельні значення у формулу (2.13) і отримуємо:

$$EB = 1083 + 5 \cdot \frac{2500}{24} + 15 \cdot \frac{2500}{T_{\text{контр}}}$$

$$EB = 1604 + \frac{37500}{T_{\text{контр}}}.$$

Побудуємо криву витрат на проведення контролю (рис. 2.6), тобто  $EB = f(T_{\text{контр}})$ .



Рисунок 2.6 – Крива втрат на проведення контролю у залежності від часу

Накладаємо криву вартості ймовірних втрат електричної енергії на криву витрат на проведення контролю і у точці перетину графіків отримаємо оптимальний період контролю на об'єкті (рис. 2.7).

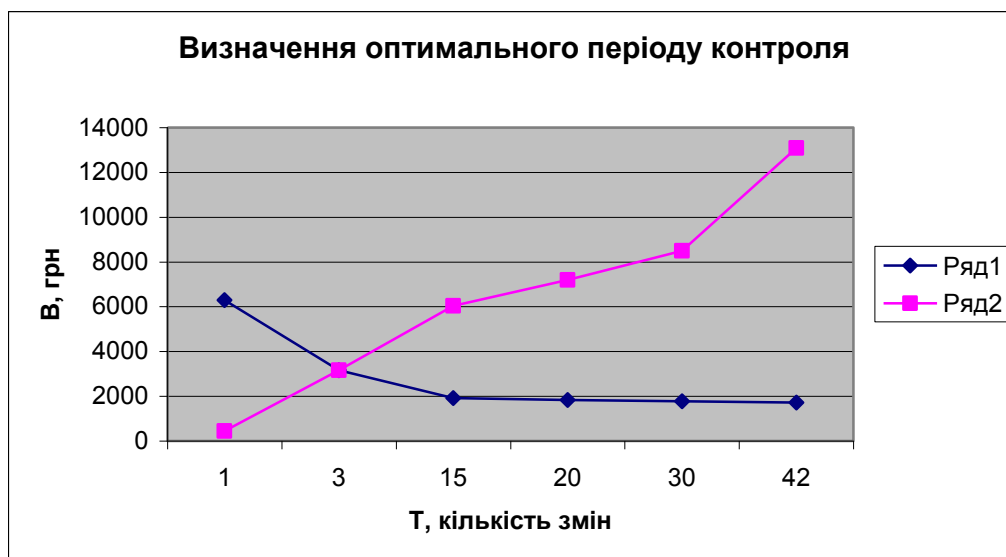


Рисунок 2.7 – Визначення оптимального періоду контролю

Таким чином, як можна визначити з рис. 2.7, оптимальний періоду контролю для технологічного агрегату, що розглядається, складає  $T_{\text{контр}} = 3 \text{ зміни} = 1 \text{ доба} = 24 \text{ години}$ .

## Висновки до розділу 2

1. В зарубіжній практиці для створення кожної локальної системи контролю і планування витрачається 10-15 тижнів, однак на реальних виробничо-господарських об'єктах є необхідність у побудові десятків таких систем і тому було запропоновано методику скорочення тривалості побудови таких систем.

2. Запропонована методика скорочення тривалості побудови систем контролю енергоспоживання для технологічних об'єктів, що базується на попередньому встановленні «стандартів» енергоспоживання для мінімальної періодичності контролю, яка дорівнює одній годині, дає можливість вже через одну або кілька діб після початку збору вихідних даних здійснювати контроль ефективності використання палива або енергії на об'єкті, що розглядається. Така методика одночасно з контролем енергоефективності, що систематично здійснюється з мінімальною періодичністю, передбачає виконання певної процедури одержання та

обробки нових вихідних даних, яка дозволяє поступово, не перериваючи процесу контролю, встановлювати «стандарти» енергоспоживання для більш тривалих періодів (доба, тиждень, місяць тощо).

3. Розроблений алгоритм послідовного переходу від меншої до більш тривалої періодичності контролю ефективності енерговикористання суттєво скорочує час, необхідний для створення систем контролю і планування енергоспоживання на будь-якому технологічному об'єкті, а також дає можливість у подальшому визначати для цього об'єкту оптимальний період контролю енергоефективності.

4. Запропоновано методику визначення оптимального періоду контролю енергоефективності, найдоцільнішого з технологічної та економічної точки зору інтервалу часу між двома найближчими перевірками виконання встановленого «стандарту», що визначається за допомогою економічно-фінансового аналізу визначення вартості ймовірних втрат електричної енергії і фінансових витрат на проведення контролю.



## **РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ «СТАНДАРТІВ» ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В СИСТЕМАХ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ**

### **3.1 Аналіз методів відбору факторів, що впливають на енергоспоживання технологічних об'єктів**

Перше питання, що постає перед нами – як визначити фактори, що впливають на процес енергоспоживання?

На кожному підприємстві існують компетентні особи, які можуть допомогти вирішити це завдання, будемо називати їх експертами. Такими особами є технологи, енергетики, оператори установок, інженери, менеджери та ін. Серед визначеного кола осіб, що дали згоду прийняти участь у вирішенні нашого завдання, потрібно провести опитування, за допомогою якого встановити показники, необхідні для подальшого моделювання процесу енергоспоживання. Розглянемо декілька методів, за допомогою яких можна провести процедуру опитування і визначити узгоджену думку більшості експертів.

#### **3.1.1 Методи експертного оцінювання**

Основними етапами процесу експертного оцінювання є [26, 27]:

- формування цілей і задач експертного оцінювання;
- формування груп і оформлення рішень для проведення експертного оцінювання;
- вибір метода отримання інформації і способів її обробки;
- підбір експертної групи і формування при необхідності анкет опитування;
- опитування експертів (експертиза);
- обробка і аналіз результатів експертизи;
- інтерпретація отриманих результатів;
- складання звіту.

Методи експертного оцінювання можна розділити на дві групи: методи колективної роботи експертної групи і методи отримання індивідуальної думки членів експертної групи [28].

Методи колективної роботи експертної групи дозволяють визначити спільну думку в процесі обговорення проблеми, що вирішується. Іноді ці методи називають методами прямого отримання колективної думки. Основна перевага цих методів виявляється у можливості різнобічного аналізу проблем. Недоліками методів являється складність процедури отримання інформації та формування групової думки по індивідуальним переконанням кожного експерта, можливість тиску авторитетів у групі.

Методи колективної роботи включають метод «мозгового штурму», «метод сценаріїв», «ділових ігор», «метод нарад» і «метод суда».

Метод «мозгового штурму». Методи цього типу відомі також під назвою колективної генерації ідей, дискусійних методів. Усі вони ґрунтуються на вільному вираженні ідей, направлених на рішення проблеми. Із цих ідей відбираються найбільш цінні.

Перевагою даного метода є висока оперативність отримання потрібного рішення. Основним його недоліком є складність організації експертизи, оскільки іноді неможливо зібрати потрібних спеціалістів, створити невимушену атмосферу і виключити вплив взаємовідносин співробітників.

Метод «сценаріїв». Являє собою сукупність правил, викладених у вигляді пропозицій спеціалістів з питання, що вирішується. Сценарій являє собою документ, що містить аналіз проблеми і пропозиції з її реалізації. Пропозиції спочатку експерти пишуть індивідуально, а потім вони узгоджуються і викладаються у формі єдиного документа.

Основною перевагою сценарія є комплексне охоплення проблеми у доступній для сприйняття формі. До недоліків можна віднести можливу нечіткість питань, що вирішуються, та недостатню обґрунтованість окремих рішень.

«Ділові ігри». Засновані на моделюванні функціонування соціальної системи управління при виконанні операцій, направлених на досягнення поставленої мети. На відміну від попередніх методів, де експертні оцінки формуються в процесі колективного обговорення, ділові ігри визначають активну діяльність експертної групи, за кожним членом якої закріплено певний обов'язок у відповідності із зазделегідь складеними правилами і програмою.

Основною перевагою ділових ігор являється можливість вироблення рішення в динаміці із урахуванням усіх етапів досліджуваного процесу при взаємодії всіх елементів суспільної системи управління. Недолік є у складності організації ділової гри в умовах, наближених до реальної проблемної ситуації.

Метод «нарад» («комісій», «круглого столу»). Це найпростіший і найтрадиційніший метод. Він являє собою проведення наради або дискусії з метою вироблення єдиного колективного рішення даної проблеми. На відміну від метода «мозгового штурму», кожний експерт може не тільки казати свою думку, але й критикувати пропозиції інших [29]. У результаті такого докладного обговорення зменшується можливість помилок під час вироблення рішення.

Перевагою метода є простота його реалізації. Однак під час наради може бути прийнята помилкова думка одного з учасників у силу його авторитету, службового положення, наполегливості або ораторських здібностей.

Метод «суда». Являється різновидом метода «нарад» і реалізується аналогічно з веденням судового процесу. У ролі «підсудних» виступають вибрані варіанти рішення, у ролі «суддів» - ті особи, що приймають рішення, у ролі «прокурорів» і «захисників» - члени експертної групи. Роль «свідків» виконують різні умови вибору і доводи експертів. При веденні такого «судового процесу» відхиляють або приймають ті чи інші рішення.

Метод «суда» доцільно використовувати при наявності декількох груп експертів, що дотримуються різних варіантів рішення.

Методи отримання індивідуальної думки членів експертної групи ґрунтуються на попередньому отриманні інформації від експертів, що опитуються незалежно один від одного, із подальшою обробкою отриманих даних [29].

Основні переваги метода індивідуального експертного оцінювання – у його оперативності, можливості в повній мірі застосовувати індивідуальні здібності кожного експерта, відсутність тиску з боку авторитетів, а також у низьких витратах на експертизу. Головним його недоліком є висока можливість суб'єктивності отримуваних оцінок через обмеженість знань одного експерта.

Для обробки отриманих у результаті опитування даних можна застосувати метод дослідження операцій. Він ґрунтується на використанні математичних (детермінованих) імовірнісних моделей, що представляють досліджуваний процес, систему або вид діяльності. Такі моделі дають кількісну характеристику проблеми і служать основою для прийняття управлінського рішення під час пошуків оптимального варіанту. Наскільки обґрунтовані ці рішення; чи є вони кращими з можливих; чи враховані і зважені всі фактори, що визначають оптимальне рішення; який критерій дозволяє визначити, що дане рішення дійсно найкраще, – таким є коло питань, що мають велике значення для керівників виробництва, і відповідь на які можна знайти за допомогою методів дослідження операцій.

Оптимізація рішень полягає в порівняльному дослідженні числових оцінок факторів, які звичайними методами оцінити неможливо. Найкраще з можливих для економічної системи рішення є оптимальним, а найкраще рішення щодо окремих елементів системи – субоптимальним.

Методи дослідження операцій покликані відшукати рішення, які були б оптимальними для якомога більшої кількості підприємств, організацій або їх підрозділів. Кількісні методи дослідження операцій засновані на досягненнях економіко-математичних та статистичних дисциплін (оптимального програмування, теорії масового обслуговування, теорії ігор, теорії графів, математичної статистики та ін.).

Методи експертних оцінок. Застосовуються у випадках, коли задача повністю або частково не піддається формалізації і не може бути вирішена відомими математичними методами.

Експертиза являє собою дослідження складних спеціальних питань на стадії вироблення управлінського рішення особами, які мають спеціальні знання та досвід, з метою отримання висновків, думок, рекомендацій, оцінок. У ході експертних досліджень використовуються новітні досягнення науки і техніки за спеціальністю експерта.

Задача експерта полягає в тому, щоб, використовуючи спеціальні знання в тій чи іншій області, минулий досвід та інтуїцію, застосувати загальні закони і окремі закономірності для розробки конкретних управлінських рішень і забезпечити цим їх оптимальність [26, 27].

Експертний висновок оформляється у формі документа, в якому фіксуються хід дослідження і його підсумки. Введення даних містить: хто, де, коли, у зв'язку з чим організовує і проводить експертизу. Далі фіксується об'єкт експертизи, вказуються методи, що застосовуються для його дослідження, і отримані в результаті дослідження дані. У заключній частині містяться висновки, рекомендації, практичні заходи, які пропонуються експертами. Висновки можуть мати категоричне формулювання («так», «ні») і ймовірнісне (припущення).

Експерт повинен вміти синтезувати інформацію, об'єднувати спеціальні знання та досвід і методи дослідження зі знанням особливостей досліджуваного об'єкта і давати об'єктивні кваліфіковані рекомендації.

Найбільш ефективно застосування методів експертних оцінок у вирішенні таких задач управління виробництвом:

- 1) аналіз складних процесів, систем, явищ, ситуацій, що характеризуються в основному якісними, неформалізуємими характеристиками;
- 2) прогнозування тенденцій розвитку виробничої системи та взаємодії з нею зовнішнього середовища;

3) визначення та ранжування згідно заданого критерію найбільш істотних факторів, що впливають на функціонування і розвиток виробничої системи;

4) підвищення ефективності математико-статистичних та інших формальних методів за рахунок більш точного визначення та оцінки деяких якісних аспектів, факторів, що не піддаються формалізації;

5) підвищення надійності оцінки цільових функцій, що мають якісний або кількісний характер, шляхом визначення думок висококваліфікованих фахівців;

6) виявлення та оцінка якісних і кількісних критеріїв, необхідних для вибору управлінських рішень;

7) оцінка альтернативних способів вирішення і виділення деяких найбільш бажаних варіантів.

Зведення до мінімуму негативного впливу суб'єктивного елементу на якість прийняття управлінських рішень - одна з головних задач оптимізації процесів прийняття рішень в управлінні суспільним виробництвом. Однією з умов подолання суб'єктивізму при підготовці управлінських рішень є методи дослідження операцій, методи експертних оцінок.

Перевагою методу є те, що він найбільше підходить для вирішення нашого завдання (відбір факторів, що впливають на енергоспоживання), передбачає самостійне незалежне прийняття рішень експертами, досить простий і не займає багато часу. Недолік - опитування проходить не анонімно (є ймовірність відмови від опитування деяких експертів), даний метод більше підходить для оцінки якісних, а не кількісних характеристик.

#### Метод «Дельфі», або метод «дельфійського оракула».

У методі Дельфі виставлення індивідуальних оцінок поєднується з послідовним ознайомленням всіх членів експертної групи з думками інших і коригуванням первісних оцінок. Свою назву цей спосіб отримав на честь грецького міста Дельфі, де знаходився відомий у всьому античному світі оракул, який пророкував майбутнє. Передбачається, що пророкування оракула колективно готувалося жрецькими храму, які використовували дану методику [30].

Зміст методу Дельфі полягає в тому, що експерти залишаються анонімними і безпосередньо не спілкуються один з одним. Кожен результат (прогноз на майбутнє) розробляється у декілька турів, і на кожному етапі використовуються результати попереднього туру опитування експертів. У першому турі експерти ранжують ті варіанти, які їм надали організатори опитування або які вони самі намітили на попередньому турі. Обробка інформації зводиться до визначення медіани (середини впорядкованого ряду) і кuartилів (середин відрізків, що утворилися ліворуч і праворуч від медіани), які визначаються у результаті обробки балів оцінювання.

У другому турі експертам направляють отримані результати і їх просять проаналізувати дані. Тих експертів, чиї оцінки виходять за діапазони верхнього та нижнього кuartиля, просять обґрунтувати свої думки і повідомити свою думку з приводу поставленого питання. Їхні аргументи можуть включати додаткові фактори, які не враховувалися іншими фахівцями, тому вони доводяться до відома всіх інших експертів (без вказівки, від кого вони отримані).

Із оцінками третього туру проводиться процедура їх упорядкування і знову визначаються медіана і кuartилі. Експерти отримують не тільки результати впорядкування даних, але і статистичний опис думок усіх членів групи і зведення аргументів прихильників верхньої і нижньої оцінок. Подібна процедура дозволяє експертам враховувати більшу кількість факторів і у разі необхідності коригувати свою думку. У наступних турах все повторюється в тій же послідовності. Медіана оцінок останнього туру приймається за узагальнену думку. Результати наступних турів опитування дають, як правило, все менший і менший розкид оцінок.

Таким чином, метод Дельфі - експертний метод комплексного аналізу альтернативних управлінських рішень, заснований для їх створення в процесі «мозкового штурму», що проводиться групою висококваліфікованих фахівців у цій галузі, для відбору найбільш раціонального для даної ситуації рішення.

Недоліки методу - багато часу триває проведення самої процедури опитування, мало - самостійне обмірковування експертами питань, оскільки результати експертизи повідомляються після кожного туру і є необхідність

перегляду думок, експерти можуть погоджуватися з думкою більшості, залишаючи в стороні власну думку. Переваги методу - анонімність процедури проведення опитування, використання зворотнього зв'язку в ході опитування, що значно підвищує об'єктивність експертних оцінок, узгодженість думок експертів як кінцевий результат опитування (що не завжди може бути при експертних оцінках).

Метод балів. Його можна застосовувати для прогнозування як корисного ефекту об'єкта, так і елементів витрат [30]. Спочатку формується експертна група з фахівців у даній області, чисельність якої має бути не менше 9 людей. Для підвищення однорідності складу групи шляхом анонімного анкетування можна зробити відсів фахівців, які, на думку більшості, не зовсім компетентні в даній області. Потім колективно встановлюються або вибираються кілька найважливіших параметрів (3-5) об'єкта, які впливають на корисний ефект, і елементи витрат.

Наступний крок - встановлення важливості параметра експертним шляхом. Розглянемо два методи. Згідно першого, кожен експерт кожному параметру об'єкта надає бали за шкалою від 0 до 10. Тоді важливість параметра визначається за формулою:

$$a_i = [\sum_{j=1}^m (B_{ij} / B_{cj})] / m \quad , \quad (3.1)$$

де  $a_i$  - вагомість  $i$ -го параметра об'єкта;  $i$  - номер параметра об'єкта;  $j$  - номер експерта;  $m$  - кількість експертів у групі;  $B_{ij}$  - бал, присвоєний  $i$ -му параметру  $j$ -м експертом;  $B_{cj}$  - сума балів, присвоєних  $j$ -м експертом всіма параметрами об'єкту.

Аналогічно визначається вагомість і інших параметрів об'єкта. Вагомість параметрів рекомендується визначати за наступною методикою. Спочатку кожен експерт знаходить співвідношення між параметрами попарно. Якщо вагомість цього параметра, на думку експерта, більша від іншого, з яким порівнюється даний параметр, йому присвоюється два бали. Якщо вагомість параметрів однакова, даним параметрам присвоюється один бал. І якщо вагомість даного параметра нижче іншого, то першому параметру балів не дається.



Вагомість параметрів визначається експертним методом по об'єктах, що характеризується кількома найважливішими параметрами різної розмірності. Для того, щоб скласти (умовно) подібні параметри і визначити корисний ефект і елементи витрат по об'єкту, рекомендується застосовувати систему балів.

При побудові системи балів для спрощення прийнято, що залежність між параметрами і корисним ефектом або елементами витрат прямо пропорційна (лінійна). При необхідності уточнення системи балів можна побудувати і криволінійні залежності.

Для прогнозування або розрахунку корисного ефекту і кожного елемента витрат по кожному класу об'єктів одного призначення будується своя система балів, оскільки на корисний ефект і елементи витрат впливають свої фактори або параметри. Наприклад, на витрати з розробки нового об'єкту в першу чергу впливають такі фактори, як кількість найменувань елементів в об'єкті, найменувань оригінальних (що вперше розробляються) елементів, коефіцієнт або категорія складності нового об'єкту. На витрати з виготовлення об'єкта впливають інші фактори: загальна кількість елементів в об'єкті, їх конструктивно-технологічна складність, серійність випуску об'єкта, повторюваність елементів (відношення загального числа елементів до числа їх найменувань), питома вага механічно оброблюваних елементів об'єкта, узагальнюючий показник організаційно - технічного рівня виробництва.

Недоліки методу - так само, як і в методі Дельфі, вимагає достатньо багато часу на проведення експертизи; легко заплутатися при оцінці факторів попарно; відсів не достатньо компетентних, на думку анонімної групи, експертів; метод більше підходить для прогнозування. Перевага - в даному випадку, якщо експерт знаходить не значний на його думку фактор, то цей чинник не потребує оцінки: його або оцінять в 0 балів (у першому випадку оцінювання), або його значення буде перекрито більш вагомим фактором (у другому випадку оцінювання). У випадку інших, розглянутих вище методів, присвоєння факторам нульової оцінки викликає труднощі під час розрахунків.

Таким чином, найдоцільнішим, для визначення необхідного кола факторів, методом опитування експертів є метод експертних оцінок. Цей метод займає менше всього часу на проведення експертизи, простий у розрахунках. Аналогічно методу Дельфі, його можна зробити анонімним, щоб уникнути відмови заповнення анкет експертами. Для покращення процедури розрахунку, варто заборонити присвоєння незначним, на думку експертів, факторам нульові значення, оскільки це ускладнює процедуру обробки даних.

### 3.1.2 Процедура обробки даних за методом експертних оцінок

За результатами обробки індивідуальних відповідей кожного з експертів, формується узагальнена матриця, де  $R$  – кількість факторів,  $m$  – кількість експертів.

Обробка даних у методі експертних оцінок складається з наступних етапів [26, 27]:

а) Визначається середнє значення суми рангів згідно формули:

$$a = \frac{1}{R} \sum_{j=1}^R \sum_{i=1}^m X_{ij} \quad (3.2)$$

Для цього:

- знаходиться сума рангів по кожному фактору;
- визначається параметр  $a$  за формулою:

$$a = \frac{1}{R} \sum_{j=1}^R (\Sigma x_1 + \dots + \Sigma x_m). \quad (3.3)$$

б) Розраховується відхилення сум рангів по кожному з факторів від середнього значення за формулою:

$$L^2 = \left( \sum_{i=1}^m X_{ij} - a \right)^2, \quad (3.4)$$

Знаходиться сума  $\sum_{j=1}^R L^2$ .

в) У разі якщо експерт присвоїв 2-ом або більше факторам однакові ранги, ці ранги називаються зв'язаними факторами, для врахування яких вводиться розрахункове значення  $T_u$ , яке обчислюється за формулою:

$$T_u = \sum_{v=1}^n (t_v^3 - t_v), \quad (3.5)$$

де  $t_v$  - кількість однакових рангів. Значення  $T_u$  розраховується для кожного експерта, який присвоїв факторам однакові ранги.

г) Розраховується коефіцієнт конкордації  $W$ , за яким буде проводитися аналіз погодженості думок експертів, щодо факторів, які розглядаються в задачі [26, 27].

Суть коефіцієнта полягає в тому, що відбувається порівняння ідеальної ситуації щодо узгодженості думок експертів з розрахованим значенням.

$$W = \frac{12 \cdot \sum_{j=1}^R L^2}{m^2 \cdot (R^3 - R) - m \cdot \sum_{u=1}^l T_u}. \quad (3.6)$$

д) Для оцінки узгодженості думок експертів, коефіцієнт конкордації необхідно перевірити за критерієм Пірсона, розрахункове значення якого визначається за формулою:

$$\chi_{rozrah}^2 = m \cdot (R - 1) \cdot W. \quad (3.7)$$

е) Розрахункове значення критерія Пірсона необхідно порівняти з критичним його значенням  $\chi_{kr}^2$  (знаходиться за спеціальними статистичними таблицями для випадку  $(R-1)$  фактор).

Якщо  $\chi_{rozrah}^2 \geq \chi_{kr}^2$ , то гіпотеза про узгодженість думок підтверджується [26, 27].

Процедуру досягнення узгодженості думок у методі експертних оцінок розглянемо на наступному прикладі:

Нехай анкетування проводили серед 6 експертів щодо 8 факторів.

Представимо експертне оцінювання у вигляді табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Початкова таблиця оцінок експертів

	Фактори							
Експерти	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	3	4	5	6	7	8
2	2	4	3	4	1	2	6	5
3	3	5	6	6	8	4	7	3
4	4	5	8	3	2	7	1	5
5	1	7	3	2	1	3	2	4
6	7	5	3	4	5	6	3	2

За описаними вище формулами розрахунку визначаємо, що:

$$a=24,75 \quad \text{Сум}L^2=85,5 \quad T=60 \quad W=0,05 \quad X_{kr}=14,07 \quad X_{roz}=2,1$$

Оскільки не виконується умова узгодженості експертів, спробуємо провести процедуру розрахунку, вилучаючи фактори чи експертів. Після вилучення кожного окремого рядка або стовпчика, формується нова таблиця даних, подальший розрахунок якої уже приведе до отримання нового результату, яким може бути досягнення узгодженості думок експертів. Тому побудуємо для себе алгоритм обробки даних, що може здійснюватися:

- за допомогою вилучення тільки факторів;
- за допомогою вилучення лише експертів;
- за допомогою побудови черговості вилучення, відповідно до поставленої мети.

Спробуємо досягти узгодженості, вилучаючи тільки фактори (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Відхилення від значень факторів

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
1	12,25	6,25	2,25	0,25	0,25	2,25	6,25	12,25
2	1,89	0,39	0,14	0,39	5,64	1,89	6,89	2,64
3	5,06	0,06	0,56	0,56	7,56	1,56	3,06	5,06
4	0,14	0,39	13,14	1,89	5,64	6,89	11,39	0,39
5	3,51	17,01	0,01	0,76	3,51	0,01	0,76	1,26
6	6,89	0,39	1,89	0,14	0,39	2,64	1,89	5,64
Сума	29,75	24,5	18	4	23	15,25	30,25	27,25

Бачимо, що відхилення по сьомому фактору найбільше, отже, вилучаємо його. Усі номери факторів, що слідуєть після вилученого, зменшуємо на одиницю. Формуємо нову табл. 3.3 без вилученого фактора.

Таблиця 3.3 – Оцінки експертів без вилученого 7-го фактора

	Фактори						
Експерти	1	2	3	4	5	6	7
1	1	2	3	4	5	6	8
2	2	4	3	4	1	2	5
3	3	5	6	6	8	4	3
4	4	5	8	3	2	7	5
5	1	7	3	2	1	3	4
6	7	5	3	4	5	6	2
	18	28	26	23	22	28	27

Знову визначаємо:

$$a=24,57 \quad \text{Сум}L^2=83,71 \quad T=42 \quad W=0,08 \quad X_{kr}=12,59 \quad X_{roz}=2,88$$

Оскільки узгодженості не досягнуто, знайдемо наступний фактор, який потрібно вилучити і сформуємо табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Відхилення від значень факторів (без 7-го фактора)

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1	9,87	4,59	1,30	0,02	0,73	3,44	14,87
2	1	1	0	1	4	1	4
3	4	0	1	1	9	1	4
4	0,73	0,02	9,87	3,44	8,16	4,59	0,02
5	4	16	0	1	4	0	1
6	5,89	0,18	2,46	0,32	0,18	2,04	6,61
Сума	25,51	21,79	14,65	6,79	26,08	12,08	30,51

Знову вилучаємо сьомий фактор. Після розрахунку даних отриманої таблиці визначаємо:

$$a=24,17 \quad \text{Сум}L^2=76,83 \quad T=30 \quad W=0,125 \quad X_{kr}=11,07 \quad X_{roz}=3,75$$

Отже, за результатами розрахунків поступово вилучено 2 експертів і 6 факторів, отримуємо узгодженість думок експертів.

Виконуючи обчислення оцінок експертів, можна побачити деякі закономірності, пов'язані зі зміною значень коефіцієнта конкордації в залежності від вилучення факторів чи експертів. Можна було б побудувати алгоритм вилучення елементів таблиці таким чином, щоб досягти якомога більшого значення цього коефіцієнта, якби не величина  $T$ - кількість зв'язаних рангів, оскільки значення зміни  $T$  буде індивідуальним для кожної таблиці. Але для того, щоб параметр  $T$  мав постійне значення, можна видаляти саме ті рядки чи стовпчики таблиці, які б не призвели до його зміни. Якщо при цьому ми будемо вилучати фактори, то знаменник формули знаходження коефіцієнта конкордації буде зменшуватися значно швидше, ніж чисельник, тобто збільшуватиметься значення коефіцієнта конкордації. А це вплине на збільшення значення  $\chi_{rozrah}^2$ . Проте також в цьому випадку зменшиться значення  $\chi_{kr}^2$ . Зазвичай його значення змінюється повільніше, ніж значення  $\chi_{rozrah}^2$ , тому в цьому випадку можливе досягнення узгодженості. Аналогічним чином можна виключати не фактори, а експертів, дивлячись, що для нас є важливішим в даній задачі. Випадок вилучення експертів при збереженні сталого значення  $T$  може привести до узгодження швидше, ніж вилучення факторів. Оскільки при цьому значення  $\chi_{kr}^2$  залишається незмінним, можемо спостерігати тенденцію збільшення  $\chi_{rozrah}^2$ , і навіть приблизно сказати, на якій ітерації ми досягнемо узгодженості думок експертів. Але зазвичай більше цікавить, все ж таки, вилучення саме факторів.

Таким чином, після досягнення узгодженості думок експертів, обираємо фактори, які на думки більшості, найбільше впливають на процес енергоспоживання. Як саме обробляти ці дані та які методи застосовувати для побудови моделі, яка б правильно відображала залежність величин.

## 3.2 Вибір методів обробки і аналізу даних при побудові математичних моделей енергоспоживання

Після того, як було визначено склад факторів, що впливають на процес енергоспоживання, потрібно знайти вид зв'язку, що відображає залежність між даними величинами. З цієї метою проаналізуємо різні математичні методи побудови моделей.

### 3.2.1 Моделі парної регресії

Парною регресією називається рівняння зв'язку двох змінних виду  $y = f(x)$ , де  $y$  - залежна змінна (результуюча ознака),  $x$  - незалежна, пояснююча змінна (ознака – фактор). Розрізняють лінійні та нелінійні регресії. Лінійна регресія описується рівнянням вигляду  $y = a + bx + \varepsilon$ .

Нелінійні регресії діляться на два класи: регресії, нелінійні відносно включених в аналіз пояснюючих змінних, але лінійні по оцінюваним параметрам (дані потребують попередньої обробки перед введенням у модель, але такі рівняння завжди можна звести до лінійного вигляду), і регресії, нелінійні по оцінюваним параметрам [31, 32].

Приклади регресій, нелінійних по пояснюючим змінним, але лінійних по оцінюваним параметрам:

- поліноми різних степенів:  $\hat{y}_x = a + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_nx^n + \varepsilon$ ;
- рівностороння гіпербола:  $\hat{y}_x = a + \frac{b}{x} + \varepsilon$ .

Приклади регресій, нелінійних по оцінюваним параметрам:

- степенева:  $\hat{y}_x = ax^b \varepsilon$ ;
- показникова:  $\hat{y}_x = ab^x \varepsilon$ ;
- експоненційна:  $\hat{y}_x = e^{a+bx} \varepsilon$ .

Найбільш часто застосовуються наступні моделі регресій:

- пряма :  $\hat{y}_x = a + bx$  ;
- гіпербола :  $\hat{y}_x = a + b/x$  ;
- парабола :  $\hat{y}_x = a + bx + cx^2$  ;
- показникова функція:  $\hat{y}_x = ab^x$  ;
- степенна функція :  $\hat{y}_x = ax^b$  та інші.

Можна використовувати й інші функції, які можна звести до лінійного вигляду. Парна регресія застосовується тоді, коли наявний домінуючий фактор, який і використовується у якості пояснювальної змінної [33].

### 3.2.2 Побудова рівнянь парної регресії

На основі існуючих даних з  $n$  спостережень за одночасною зміною двох параметрів  $x$  і  $y$   $\{(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n\}$  необхідно визначити аналітичну залежність  $\hat{y}=f(x)$ , яка б найкращим чином описувала дані спостереження.

Побудова рівнянь парної регресії здійснюється у два етапи (передбачається рішення двох задач):

- специфікація моделі (визначення вигляду аналітичної залежності  $\hat{y}=f(x)$ );
- оцінка параметрів обраної моделі.

Застосовуються три основні методи вибору вигляду аналітичної залежності [34, 35]:

- аналітичний, тобто виходячи з теорії взаємозв'язку, що вивчається;
- експериментальний, тобто шляхом порівняння величини залишкової дисперсії або середньої похибки апроксимації, розрахованих для різних моделей регресії (метод перебору);

– графічний метод (на основі аналізу поля кореляції). Розглянемо, як графічний аналіз застосовується у методі головних компонент. На точковому графіку експериментальних даних кожний зразок зображується в координатах  $(t_1, t_2)$ , що позначаються PC1 и PC2. Близкість двох точок означає їх схожість, тобто



додатню кореляцію. Точки, що розміщуються під прямим кутом, являються некорельованими, а розміщені діаметрально протилежно – мають від’ємну кореляцію (рис. 3.1).

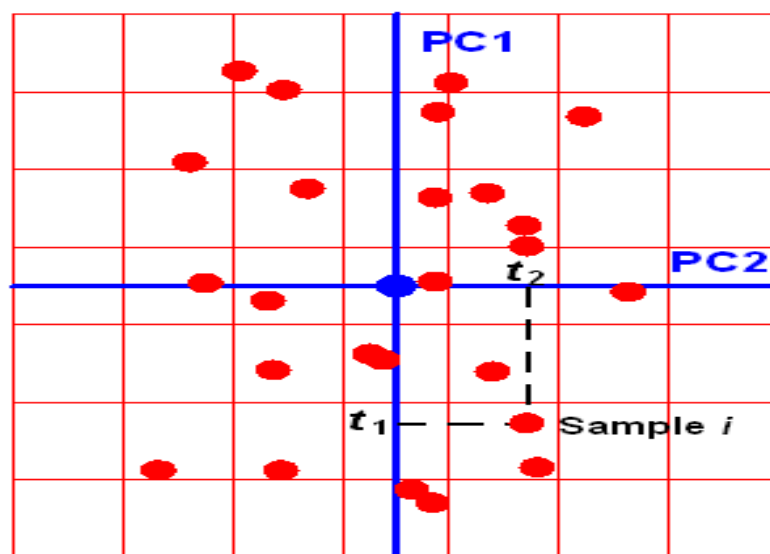


Рисунок 3.1 – Точковий графік залежності експериментальних даних

Для оцінки параметрів рівняння багатофакторної регресії застосовують метод найменших квадратів (МНК). МНК дозволяє отримати такі оцінки параметрів, при яких сума квадратів відхилень фактичних значень результативної ознаки у від теоретичних значень є мінімальною  $\sum (y - \hat{y}_x)^2 \rightarrow \min$ .

У випадку лінійної регресії параметри  $a$  і  $b$  визначаються з наступної системи нормальних рівнянь методу МНК:

$$\begin{cases} na + b\sum x = \sum y \\ a\sum x + b\sum x^2 = \sum yx \end{cases} \quad (3.8)$$

Можна використовувати готові формули, що випливають з цієї системи:

$$a = \bar{y} - b\bar{x}; \quad b = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x^2} = \frac{\overline{yx} - \bar{y} \cdot \bar{x}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}. \quad (3.9)$$

Для визначення невідомих коефіцієнтів рівняння можна також скористатися методом максимальної правдоподібності [33]. Це ще один розумний спосіб побудови оцінки невідомого параметра. Він полягає в тому, що у якості «найбільш правдоподібного» значення параметра беруть значення  $\theta$ , яке максимізує вірогідність

отримати при  $n$  експериментах дану вибірку  $x=(x_1, \dots, x_n)$ . Це значення параметра  $\theta$  залежить від вибірки і являється шуканою оцінкою.

Якщо за допомогою методів вибору вигляду аналітичної залежності визначили, що взаємозв'язок між величинами, які аналізуються, є нелінійним, потрібно будувати модель на основі нелінійної регресії.

### 3.2.3 Характерні види нелінійної регресії

Розглянемо, який аналітичний вигляд може приймати характеристика залежності двох величин із нелінійним взаємозв'язком [20].

Гіперболічна регресія:  $y_x = a_0 + a_1 / x$ .

Заміна до лінійного вигляду:  $x' = 1/x$ ;  $y' = y$ .

Невідомі коефіцієнти залежності визначаємо з наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} na + b \sum 1/x = \sum y; \\ a \sum 1/x + b \sum 1/x^2 = \sum y \frac{1}{x}. \end{cases} \quad (3.11)$$

Або знаходимо їх унаслідок використання вже готових формул:

$$a_1 = \frac{n \sum \frac{y}{x} - \sum \frac{1}{x} \sum y}{n \sum \frac{1}{x^2} - \left( \sum \frac{1}{x} \right)^2}; a_0 = \frac{1}{n} \sum y - \frac{1}{n} a_1 \sum \frac{1}{x}. \quad (3.12)$$

Експоненційна регресія:  $y_x = e^{a_0 + a_1 x}$

Заміна до лінійного вигляду:  $x' = x$ ;  $y' = \ln y$ .

Визначаємо невідомі коефіцієнти рівняння за наведеними формулами:

$$a_1 = \frac{n \sum x \ln y - \sum x \sum \ln y}{n \sum x^2 - \left( \sum x \right)^2}; a_0 = \frac{1}{n} \sum \ln y - \frac{1}{n} a_1 \sum x. \quad (3.13)$$

Модифікована експонента:  $y_x = K + a_0 \times a_1^x$ ,  $(0 < a_1 < 1)$ .

Заміна до лінійного вигляду:  $x' = x$ ,  $y' = \ln|y - K|$

Визначення коефіцієнтів виконаємо за формулою:

$$a_1 = \frac{n \sum (x \ln |y - K|) - \sum x \sum \ln |y - K|}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}; \ln |a_0| = \frac{1}{n} \sum \ln |y - K| - \frac{1}{n} \ln a_1 \sum x, \quad (3.14)$$

Величина границі росту величини  $K$  обирається попередньо на основі аналізу поля кореляцій або з якісних міркувань. Параметр береться зі знаком «+», якщо  $y_x > K$  і зі знаком «-» у протилежному випадку.

Степенева функція:  $y_x = a_0 \times x^{a_1}, (a_0 > 0)$ .

Заміна до лінійного вигляду:  $x' = \ln x, y' = \ln y$ .

Визначення коефіцієнтів здійснюється за формулою:

$$a_1 = \frac{n \sum (\ln x \ln y) - \sum \ln x \sum \ln y}{n \sum (\ln x)^2 - (\sum \ln x)^2}; \ln a_0 = \frac{1}{n} \sum \ln y - \frac{1}{n} \ln a_1 \sum \ln x. \quad (3.15)$$

Показникова функція:  $y_x = a_0 \times a_1^x$ .

Заміна до лінійного вигляду:  $x' = x, y' = \ln y$ .

Визначення коефіцієнтів здійснюється за формулою:

$$\ln a_0 = \frac{1}{n} \sum \ln y - \frac{1}{n} \ln a_1 \sum x; \ln a_1 = \frac{n \sum (x \ln y) - \sum x \sum \ln y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}, \quad (3.16)$$

Логарифмічна функція:  $y_x = a_0 + a_1 \ln x$ .

Заміна до лінійного вигляду:  $x' = \ln x, y' = y$ .

Визначення коефіцієнтів здійснюється за формулою:

$$a_1 = \frac{n \sum \ln x y - \sum \ln x \sum y}{n \sum (\ln x)^2 - (\sum \ln x)^2}; a_0 = \frac{1}{n} \sum y - \frac{1}{n} a_1 \sum \ln x. \quad (3.17)$$

Парабола другого порядку:  $y_x = a_0 + a_1 x^1 + a_2 x^2$

Парабола другого порядку має 3 параметри  $a_0, a_1, a_2$ , які визначаються із системи трьох рівнянь:

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \sum x + a_2 \sum x^2 = \sum y; \\ a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 + a_2 \sum x^3 = \sum xy; \\ a_0 \sum x^2 + a_1 \sum x^3 + a_2 \sum x^4 = \sum x^2 y. \end{cases} \quad (3.18)$$

### 3.2.4 Оцінка щільності зв'язку між залежною та незалежною змінною

Наступним кроком, після побудови рівняння регресії, має стати перевірка відповідності моделі реальному характеру зв'язку величин. Це необхідно тоді, коли ми визначаємо вигляд аналітичної залежності параметрів за допомогою експериментального методу (або методу перебору). Це, також, потрібно для того випадку, коли ми попередньо графічно аналізували вигляд залежності, оскільки певному набору точок на площині можуть відповідати декілька функцій, одну з яких нам і допоможе обрати розрахунок наведених нижче показників.

Щільність зв'язку явищ, що вивчаються при побудові рівнянь лінійної регресії, оцінюють за допомогою лінійного коефіцієнта парної кореляції  $r_{xy}$  за формулою:

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\overline{yx} - \bar{y}\bar{x}}{\sigma_x \sigma_y}, (-1 \leq r_{xy} \leq 1), \quad (3.19),$$

де  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  - середньоквадратичні відхилення величин  $x$  та  $y$ ;  $\text{cov}(x, y)$  - відповідно їх коваріація,

та індекса кореляції  $\rho_{xy}$  для нелінійної регресії ( $0 \leq \rho_{xy} \leq 1$ ) за формулою:

$$\rho_{xy} = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{\text{ост}}^2}{\sigma_n^2}} = \sqrt{1 - \frac{\sum (y - \hat{y}_x)^2}{\sum (y - \bar{y})^2}}. \quad (3.20)$$

Частку дисперсії, що пояснюється регресією, у загальній дисперсії результативної ознаки характеризує коефіцієнт детермінації  $r_{xy}^2$  (для лінійної регресії) або індекс детермінації  $R^2 = \rho_{xy}^2$  (для нелінійної регресії) [36].

Коефіцієнт детермінації – квадрат коефіцієнта або індекса кореляції.

Для оцінки якості побудованої моделі регресії можна використати показник (коефіцієнт, індекс) детермінації  $R^2$  або середню похибку апроксимації.

Середня похибка апроксимації – середнє відносне відхилення розрахункових значень від фактичних, визначається за формулою:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y - \hat{y}}{y} \right| 100\%, \quad (3.21)$$

де,  $\hat{y}$ ,  $y$ ,  $n$  - відповідно розраховане, фактичне значення функції  $y$  та  $n$  - кількість вимірів.

Побудоване рівняння регресії вважається задовільним, якщо значення  $\bar{A}$  не перевищує 10-12%.

Чим більше значення показників коефіцієнта парної кореляції, індекса кореляції і коефіцієнта детермінації або чим нижче середня похибка апроксимації, тим краще модель описує вихідні дані.

Оцінка значимості всього рівняння регресії в цілому здійснюється за допомогою  $F$  – критерія Фішера.

$F$  – критерій Фишера полягає у перевірці гіпотези  $H_0$  про статистичну незначимість рівняння регресії. Для цього виконується порівняння фактичного  $F_{fakt}$  і критичного (табличного)  $F_{tabl}$  значень  $F$  – критерія Фішера.

$F_{fakt}$  визначається із співвідношення значень факторної і залишкової дисперсії, розрахованих на один степінь свободи за формулою:

$$F_{fakt} = \frac{\sum \frac{(\hat{y} - \bar{y})^2}{m}}{\sum \frac{(y - \hat{y})^2}{n - m - 1}} = \frac{r_{xy}^2}{1 - r_{xy}^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m}, \quad (3.22)$$

де  $n$  - число одиниць сукупності;  $m$  - число параметрів при змінних.

Для лінійної регресії  $m = 1$ .

Для нелінійної регресії замість  $r_{xy}^2$  у наведеній формулі використовується  $R^2$ .

$F_{tabl}$  - максимально можливе значення критерію під впливом випадкових факторів при вільних степенях свободи  $k_1 = m, k_2 = n - m - 1$  (для лінійної регресії  $m = 1$ ) та рівні значимості  $\alpha$ .

Рівень значимості  $\alpha$  - ймовірність відкинути правильну гіпотезу за умови, що вона є вірною. Звичайну величину  $\alpha$  приймаємо рівною 0,05 або 0,01.

Якщо  $F_{tabl} < F_{fakt}$ , то  $H_0$  - гіпотеза про випадковість оцінюваних характеристик відхиляється і визнається їх статистична значимість і надійність. Якщо  $F_{tabl} > F_{fakt}$ , то гіпотеза  $H_0$  не відхиляється і визнається статистична незначимість, ненадійність рівняння регресії.

Для оцінки статистичної значимості коефіцієнтів лінійної регресії та лінійного коефіцієнту парної кореляції застосовується  $t$ -критерій Стюдента і розраховуються довірчі інтервали кожного з показників [36].

Згідно  $t$ -критерію робиться гіпотеза  $H_0$  про випадкову природу показників, тобто про незначимість їх відхилення від нуля. Далі за формулою нижче розраховуються фактичні значення критерію для оцінюваних коефіцієнтів регресії та коефіцієнта кореляції шляхом зіставлення їх значень з величиною стандартної похибки.

$$t_b = \frac{b}{m_b}; t_a = \frac{a}{m_a}; t_r = \frac{r_{xy}}{m_{r_{xy}}}. \quad (3.23)$$

Стандартні похибки параметрів лінійної регресії та коефіцієнта кореляції визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} m_b &= \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y}_x)^2 / (n-2)}{\sum (x - \bar{x})^2}} = \sqrt{\frac{S_{ost}^2}{\sum (x - \bar{x})^2}} = \frac{S_{ost}}{\sigma_x \sqrt{n}}; \\ m_a &= \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y}_x)^2}{(n-2)} \cdot \frac{\sum x^2}{n \sum (x - \bar{x})^2}} = \sqrt{S_{ost}^2 \frac{\sum x^2}{n^2 \sigma_x^2}} = S_{ost} \frac{\sqrt{\sum x^2}}{n \sigma_x}; \\ m_{r_{xy}} &= \sqrt{\frac{1 - r_{xy}^2}{n-2}}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Порівнюючи фактичне і критичне (табличне) значення  $t$ -статистики приймають або відхиляють гіпотезу  $H_0$ .

$t_{tabl}$  - максимально можливе значення критерія під впливом випадкових факторів при даному степені свободи  $k = n - 2$  та рівні значимості  $\alpha$ .

Зв'язок між  $F$ -критерієм Фішера (при  $k_1=1; m=1$ ) і  $t$ -критерієм Стюдента визначаються рівністю:  $t_r^2 = t_b^2 = t_r^2 = \sqrt{F}$ .

Якщо  $t_{tabl} < t_{fakt}$ , то  $H_0$  відхиляється, тобто  $a, b, r_{xy}$  не випадково відрізняються від нуля і сформувалися під впливом систематично діючого фактора  $x$ .

Якщо  $t_{tabl} > t_{fakt}$ , то гіпотеза  $H_0$  не відхиляється і визнається випадкова природа формування  $a, b, r_{xy}$ .

Значимість коефіцієнта детермінації  $R^2$  (індекса кореляції) визначається за допомогою  $F$ -критерія Фішера. Фактичне значення критерія Фішера визначається за формулою:

$$F_{fakt} = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m}. \quad (3.25)$$

$F_{tabl}$  визначається з таблиці при степенях свободи  $k_1=1, k_2=n-2$  та при заданому рівні значимості  $\alpha$ . Якщо  $F_{tabl} < F_{fakt}$ , то визнається статистична значимість коефіцієнта детермінації. У формулі для  $F_{fakt}$  величина  $m$  визначає кількість параметрів при змінних у відповідному рівнянні регресії [31, 32, 34].

Наведені вище методи дозволяють побудувати однофакторну модель регресії. Але для більшості реальних об'єктів управління ефективністю використання енергії (особливо, виробничих) на величину витрат енергії впливають численні й різноманітні фактори. Це, перш за все, показники, що характеризують результати і умови протікання виробничого процесу (наприклад, обсяг виготовленої продукції або виконаної роботи, число годин роботи основного обладнання, тиск, температура, швидкість та інші характеристики технологічного процесу, параметри кліматичних умов і т.п.).

У цьому випадку «стандарт» енергоспоживання на даному об'єкті повинен встановлюватися на основі деякої багатофакторної математичної моделі процесу енергоспоживання. Зокрема, найбільш просто така математична модель може бути побудована у вигляді рівняння багатофакторної лінійної регресії.

### 3.2.5 Багатофакторна регресія та кореляція

Ще однією не менш важливою задачею при побудові систем оперативного контролю енергоспоживання є власне створення моделі. Як уже було зазначено, один з недоліків систем контролю – це включення недостатньо кількості факторів у рівняння регресії, яке зазвичай будують у вигляді прямолінійної однофакторної залежності або у вигляді параболи. Однак на процес енергоспоживання на виробництві впливає деяка множина чинників: це і технологічні параметри процесу виробництва, і параметри навколишнього середовища, зв'язок яких з певними енергетичними показниками може відображатися у вигляді будь-якої криволінійної функції [20]. Тому перед тим, як будувати модель, потрібно зібрати інформацію про якомога більшу кількість факторів, які можуть впливати на процес енергоспоживання. Вони повинні вимірюватися кількісно. Адже якісні параметри виробничого процесу дуже складно ввести в числовому вигляді у рівняння регресії (напр., такі чинники, як стан технічного обладнання, вірогідність збоїв у роботі, кількість змін і годин роботи, кваліфікація робочого персоналу та ін.). Іноді, якщо це необхідно, якісні показники враховуються в моделі за допомогою індексів, які теж мають власні коефіцієнти, або будується декілька моделей для різних режимів роботи технологічного обладнання.

Багатофакторна регресія – рівняння зв'язку з декількома незалежними змінними:  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_p)$ ,

де  $y$  – залежна змінна (результативна ознака),  $x_1, x_2, \dots, x_p$  – незалежні змінні (фактори).

Багатофакторна регресія застосовується у тих випадках, коли із множини факторів, що впливають на результативну ознаку, не можна виділити один домінуючий фактор і необхідно враховувати вплив декількох факторів.

Основна мета багатофакторної регресії – побудувати модель з великим числом факторів, визначивши при цьому вплив кожного з них окремо, а також спільний їх вплив на показник, що моделюється [22, 23, 37].



Постановка задачі багатofакторної регресії: за існуючими даними з  $n$  спостережень за спільними змінами  $n+1$  параметра  $y$  та  $x_p$  необхідно визначити аналітичну залежність  $\hat{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_p)$ , що найкращим чином описує дані спостережень.

Як і у випадку парної регресії, побудова рівняння багатofакторної регресії відбувається у два етапи:

- специфікація моделі;
- оцінка параметрів обраної моделі.

Специфікація моделі включає в себе вирішення двох задач [37]:

- а) відбір  $p$  факторів  $x_j$ , що найбільш впливають на величину  $y$ ;
- б) відбір виду рівняння регресії  $\hat{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_p)$ .

Які ж саме фактори потрібно включати в модель багатofакторної регресії, якими принципами користуватися для їх відбору, щоб отримати характеристику, яка достовірно відображає зв'язок і вплив усіх факторів на результуючу залежну змінну, у результаті моделювання. Наведемо нижче невеликий аналіз проведення даної процедури.

Включення у рівняння багатofакторної регресії того чи іншого набору факторів пов'язано, перш за все, з уявленнями дослідника про природу взаємозв'язку показника, що моделюється, з іншими явищами. Фактори, що включаються до багатofакторної регресії, повинні відповідати наступним умовам [35]:

1. Вони повинні вимірюватися кількісно. Якщо необхідно включити в модель якісний фактор, що не має кількісного виміру, то йому потрібно надати кількісну визначеність (наприклад, до моделі родючості ґрунту якість його задається у вигляді балів; у моделі вартості об'єктів нерухомості районам надаються ранги);
2. Фактори не повинні бути взаємно корельованими і тим більше знаходитися у точному функціональному зв'язку. Якщо між факторами існує висока кореляція, то не можна визначити їх ізольований вплив на результативну ознаку.

3. Фактори, які включаються у модель багатфакторної регресії мають пояснювати варіацію незалежної змінної. Якщо будується модель з набором  $p$  факторів, то для неї розраховується показник детермінації  $R^2$ , який фіксує частку поясненої варіації результативної ознаки за рахунок  $p$  факторів регресії, що розглядаються. Вплив інших, не врахованих у моделі, факторів оцінюється як  $(1-R^2)$  з відповідною залишковою дисперсією  $S^2$ . При додатковому включенні у регресію  $(p+1)$  – фактора  $x_{p+1}$  коефіцієнт детермінації має зростати, а залишкова дисперсія зменшуватися, тобто:  $R_{p+1}^2 \geq R_p^2$ ,  $S_{p+1}^2 \leq S_p^2$ .

Якщо ж цього не відбувається і значення цих показників практично мало відрізняються один від іншого, то фактор  $x_{p+1}$ , що включається у аналіз не покращує модель і практично являється зайвим фактором.

Насичення моделі зайвими факторами не тільки не зменшує величину залишкової дисперсії і не збільшує показник детермінації, але й призводить до статистичної незначимості параметрів регресії по  $t$ -критерію Стюдента.

Відбір факторів виконується на підставі якісного теоретико-економічного аналізу і зазвичай здійснюється у два етапи:

- на першому відбираються фактори, виходячи із суті проблеми;
- на другому – на основі матриці показників кореляції визначають  $t$ -критерій статистики для параметрів регресії.

Коефіцієнти інтеркореляції (тобто кореляція між пояснюючими змінними) дозволяють виключати з моделі дублюючі фактори. Вважається, що дві змінні є явно колінеарними, тобто знаходяться між собою у лінійному зв'язку, якщо  $r_{x_i x_j} \geq 0,7$ .

Якщо фактори є явно колінеарними, то вони дублюють один одного і один з них рекомендується вилучити з регресії. Перевагу при цьому надаємо тому фактору, який при достатньо тісному зв'язку з результатом, має найменшу щільність зв'язку з іншими факторами. У цій умові проявляється специфіка багатфакторної регресії як

метода дослідження комплексного впливу факторів в умовах їх незалежності один від одного.

Найбільші складності у використанні апарату багатфакторної регресії виникають за наявності мультиколінеарності факторів, коли більше ніж два фактори пов'язані між собою лінійною залежністю, тобто має місце спільний вплив факторів один на одного.

Для оцінки мультиколінеарності факторів може виконуватися визначник матриці парних коефіцієнтів кореляції  $r_{x_i x_j}$  між факторами [36, 37].

Існує ряд підходів для позбавлення від сильної міжфакторної кореляції:

1. Вилучення з моделі одного або декількох факторів.

2. Перетворення факторів, при якому зменшується кореляція між ними. Наприклад, переходять від існуючих змінних до їх лінійних комбінацій, не корельованих одна з одною (метод головних компонент).

3. Перехід до суміщених рівнянь регресії, тобто до рівнянь, які відображають не лише вплив факторів, але і їх взаємодію. Так, якщо  $y = f(x_1, x_2, x_3)$ , то можлива побудова наступного суміщеного рівняння:

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + \varepsilon \quad (3.26)$$

Дане рівняння включає в себе взаємодію двох факторів (взаємодію першого порядку). Іноді такі взаємодії можуть виявитися несуттєвими, тому не доцільне повне включення в модель усіх факторів, між якими є взаємодія. Так, якщо аналіз суміщеного рівняння показав істотність взаємодії лише факторів  $x_1$  та  $x_3$ , то рівняння матиме вигляд:  $y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{13} x_1 x_3 + \varepsilon$ .

Після вилучення колінеарних факторів здійснюється процедура відбору факторів, що найбільш впливають на зміну результативної ознаки (факторів, що включаються в регресію). Підходи до відбору факторів на основі показників кореляції можуть бути різними.

Найбільш поширене застосування отримали наступні методи побудови рівнянь багатфакторної регресії:

- метод виключення;
- метод включення;
- покроковий регресійний аналіз.

Кожний із цих методів по-своєму вирішує проблему відбору факторів, даючи в цілому близькі результати – відсів факторів з повного їх набору (метод вилучення), додаткове введення фактора (метод включення), вилучення раніше введеного фактора (покроковий регресійний аналіз).

Для процедури відсіву факторів найбільш часто застосовується матриця часткових коефіцієнтів кореляції.

Ранжування факторів, що приймають участь у багатфакторній лінійній регресії, можна провести за допомогою стандартизованих коефіцієнтів регресії ( $\beta$ -коефіцієнти). Ця ж мета може бути досягнута за допомогою часткових коефіцієнтів кореляції – для лінійних зв'язків. Під час нелінійної взаємодії досліджуваних ознак цю функцію виконують часткові індекси детермінації. Крім того, часткові показники кореляції широко застосовуються під час вирішення проблеми відбору факторів: доцільність включення того чи іншого фактора в модель доводиться величиною показника часткової кореляції.

Часткові коефіцієнти (чи індекси) кореляції характеризують щільність зв'язку між результатом і відповідним фактором при вилученні впливу інших факторів, що включаються до рівняння регресії.

Показники часткової кореляції являють собою відношення залишкової дисперсії, отриманої в результаті додаткового включення в аналіз нового фактора, до залишкової дисперсії, що мала місце до введення в модель нового фактора.

У загальному вигляді при наявності  $p$  факторів для рівняння  $y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p + \varepsilon$  коефіцієнт часткової кореляції, що змінює вплив фактора  $x$  за умови незмінності інших факторів, можна визначити за формулою:

$$r_{yx_i \cdot x_2 \dots x_p} = \sqrt{1 - \frac{1 - R_{yx_1 x_2 \dots x_p}^2}{1 - R_{yx_2 \dots x_p}^2}}. \quad (3.27)$$

Усі розглянуті вище методи дозволяють побудувати модель процесу енергоспоживання на виробництві. Це є одним із завдань, яке вирішено для того, щоб зробити ще один крок на шляху вдосконалення систем оперативного контролю для їх застосування.

### 3.3 Приклад встановлення «стандарту» енергоспоживання на основі рівняння багатofакторної регресії

Для наведеного нижче прикладу було визначено щодобові показники споживання електричної потужності на компресорній станції за три місяці. У якості параметрів виробничого процесу ми взяли за цей же період часу щодобові значення температури повітря у виробничому приміщенні ( $t, ^\circ C$ ), технологічного тиску ( $p, \text{tehn.atm}$ ) і питомої витрати повітря (робочого тіла) ( $\rho, \frac{m^3}{\text{doba}}$ ). Спробуємо визначити, яким чином впливає кожний з визначених факторів на величину електричної потужності. Для цього необхідно побудувати три характеристики, окремо для кожної пари залежностей:

- 1) Електричної потужності від температури повітря у виробничому приміщенні  $P(t)$ ;
- 2) Електричної потужності від виробничого тиску  $P(p)$ ;
- 3) Електричної потужності від питомої витрати повітря  $P(\rho)$ .

Для того, що зробити припущення щодо того, який вигляд можуть мати дані характеристики, скористаємося графічним методом, тобто зобразимо на площині набір точок, які відповідають погодинним значенням кожної пари залежностей.

1). Залежність  $P(t)$ . Для попереднього припущення щодо вигляду характеристики  $P(t)$  скористаємося графічним методом: представимо у системі координат дану залежність у вигляді набору точок (рис. 3.2), де кожному єдиному значенню температури відповідає єдине значення потужності. З вигляду

характеристики, яку формує більшість точок на площині робимо припущення щодо аналітичного вигляду залежності  $P(t)$ .

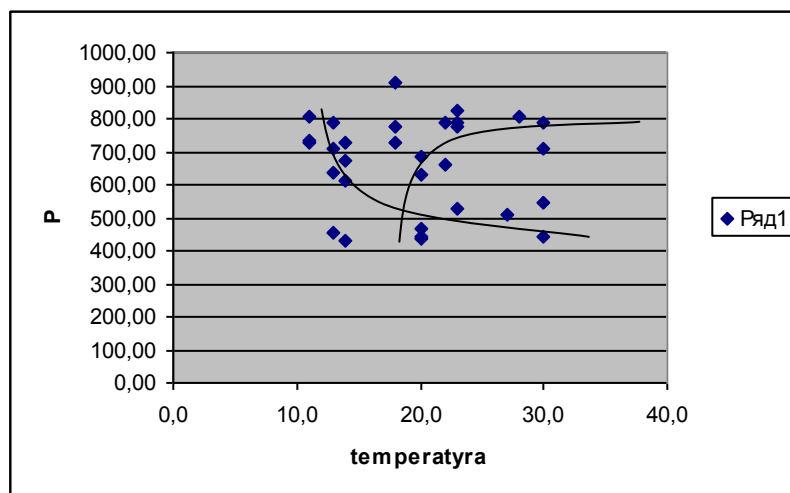


Рисунок 3.2 – Точковий графік залежності  $P(t)$

Сказати, що графічний вигляд залежності  $P(t)$  є визначеним, не можна, оскільки немає чіткої тенденції, яка б формувала одну з відомих графічних характеристик елементарних функцій, тому застосуємо метод перебору – перевіримо декілька характерних функцій, які б могли описувати дану залежність і оберемо ту, що найточніше відображатиме зв'язок між величинами електричної потужності і температури. Точність і адекватність кожної моделі визначатиметься на основі наведених у попередньому розділі статистичних методів.

Із сукупності точок на рисунку 3.2, можна припустити, що дану залежність може описувати гіпербола (на графіку позначено дві криві). Але оскільки розкид точок значний, потрібно перевірити декілька функцій. Крім того, можна сказати, що жодна з функцій не буде достатньо точно описувати залежність  $P(t)$ , оскільки деяка значна сукупність точок знаходитиметься поза межами нашої функції, тобто залишиться не визначеною. Отже, перевіримо декілька наявних функціональних залежностей і оцінивши отримані моделі, виберемо ту, що матиме найменшу похибку апроксимації.

1. Припустимо, що вигляд характеристики описується прямолінійною функцією:  $y = a + bx$ .

Застосовуючи метод найменших квадратів (МНК), отримуємо  $y = 626 + 1,846x$ .

Оцінимо отриману модель за допомогою середньої похибки апроксимації, за формулою (3.21):  $\bar{A} = \frac{1}{31} 6,252 * 100\% = 20,2\%$ .

Аналогічним чином за розглянутою вище методикою визначаємо інші функціональні залежності  $P(t)$ :

2. Гіперболічна регресія має вигляд:  $y_x = 620,8 + 741,6 / x$ ;  
 $\bar{A} = \frac{1}{31} 6,066 * 100\% = 19,57\%$ .

3. Регресія у вигляді експоненти:  $y_x = e^{6,53 + 0,0032x}$ ;  $\bar{A} = \frac{1}{31} 6,113 * 100\% = 19,7\%$ .

4. Степенева регресія:  $y_x = 5308 \times x^{-0,72}$ ;  $\bar{A} = \frac{1}{31} 8,1 * 100\% = 26,1\%$ .

5. Показникова регресія:  $y_x = 691 \times (0,997)^x$ ;  $\bar{A} = \frac{1}{31} 6,104 * 100\% = 19,69\%$ .

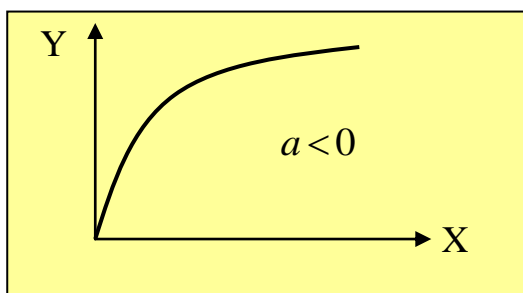
6. Логарифмічна регресія:  $y_x = 775 - 38,5 \ln x$ ;  $\bar{A} = \frac{1}{31} 6,08 * 100\% = 19,61\%$ .

7. Парабола другого порядку:  $y_x = 738 - 6,15x + 0,105x^2$ ;  
 $\bar{A} = \frac{1}{31} 6,08656 * 100\% = 19,63\%$ .

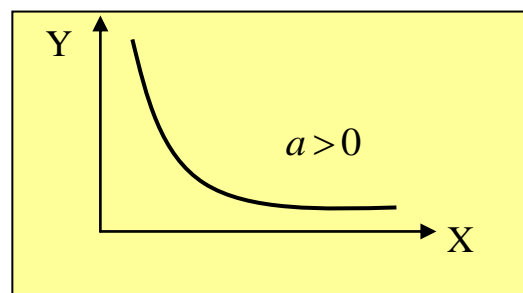
Бачимо, згідно середньої похибки апроксимації  $\bar{A}$ , найкраще описує залежність  $P(t)$  гіперболічна функція. Спробуємо більш складну гіперболічну

модель вигляду:  $y_x = \frac{1}{\frac{a}{x} + b}$ . Покажемо на графіку вигляд функції в залежності від

знаку коефіцієнта  $a$  (рисунок 3.3):



a)



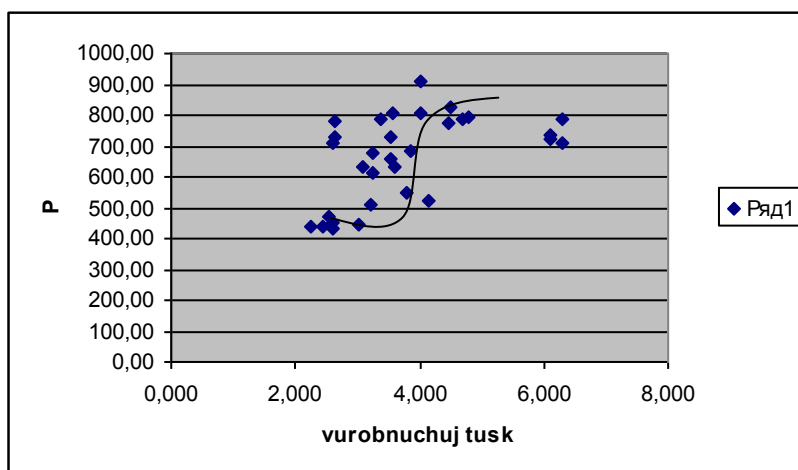
б)

Рисунок 3.3 – Графічний вигляд функції  $y_x = 1/(a/x + b)$  за умови:а)  $a < 0$ ;б)  $a > 0$ 

Отримуємо  $y_x = \frac{1}{\frac{-0,016}{x} + 0,0025}$ . Для даної моделі визначаємо середню похибку

апроксимації:  $\bar{A} = \frac{1}{31} 7,53 \cdot 100\% = 24,3\%$ . Отже, обираємо простий вигляд гіперболічної функції  $y_x = 620,8 + 741,6/x$  для залежності  $P(t)$ .

2) Залежність  $P(p)$ . Аналогічно п. 1) для того, щоб зробити припущення щодо характеристики  $P(p)$ , спробуємо визначити до вигляду якої функції найбільше тяжіє залежність потужності від виробничого тиску. Будуємо точковий графік  $P(p)$  (рисунок 3.4):

Рисунок 3.4 – Точковий графік залежності  $P(p)$



Графік даної залежності можуть влаштовувати декілька типів функцій: це може бути дзеркальна парабола; також вигляд цієї характеристики може описувати рівняння гіперболи вигляду  $y_x = \frac{1}{ke^{-x} + b}$  (рисунок 3.5):

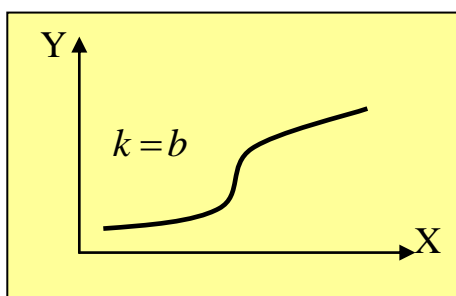


Рисунок 3.5 – Графічний вигляд функції  $y_x = \frac{1}{ke^{-x} + b}$

Знову застосуємо метод перебору для функцій, які можуть описувати даний вид залежності:

1. Парабола другого порядку:  $y_x = -176 + 370x - 36x^2$ ;  $\bar{A} = \frac{1}{31} 4,185 * 100\% = 13,5\%$ .

2. Експоненціальна регресія:  $y_x = e^{6+0,11x}$ ;  $\bar{A} = \frac{1}{31} 5,221 * 100\% = 16,8\%$ .

3. Степенева регресія:  $y_x = 361 \times x^{0,45}$ ;  $\bar{A} = \frac{1}{31} 4,88 * 100\% = 15,7\%$ .

4. Показникова регресія:  $y_x = 446 \times (1,12)^x$ ;  $\bar{A} = \frac{1}{31} 5,41 * 100\% = 17,45\%$ .

5. Гіперболічна регресія вигляду  $y_x = \frac{1}{\frac{a}{x} + b}$ ;  $y_x = \frac{1}{\frac{0,0042}{x} + 0,00036}$ ;

$\bar{A} = \frac{1}{31} 4,93 * 100\% = 15,9\%$ .

6. Гіперболічна регресія вигляду  $y_x = \frac{1}{ke^{-x} + b}$ ;  $y_x = \frac{1}{0,0084e^{-x} + 0,0013}$ ;

$\bar{A} = \frac{1}{31} 4,1849 * 100\% = 13,49\%$ .

7. Експоненціальна регресія вигляду:  $y = ae^{kx}$ ;  $y = 439,54e^{0,102x}$ ;

$$\bar{A} = \frac{1}{31} 5,207 * 100\% = 16,8\%.$$

8. Експоненціальна регресія вигляду:  $y = be^{k/x}$ ;  $y = 1091e^{-1,81/x}$ ;

$$\bar{A} = \frac{1}{31} 4,554 * 100\% = 14,7\%.$$

У результаті перебору інших функцій отримуємо неприпустимо велике значення похибки апроксимації. Отже, обираємо гіперболічну регресію вигляду

$y_x = \frac{1}{0,0084e^{-x} + 0,0013}$ , оскільки при даній характеристиці маємо найменшу похибку апроксимації, що дорівнює 13,49%.

2) Залежність  $P(\rho)$ . Аналогічно п. 1) для припущення вигляду характеристики  $P(\rho)$  спробуємо визначити вигляд функції, до якої найбільше тяжіє залежність потужності від питомої витрати повітря (рисунок 3.6).

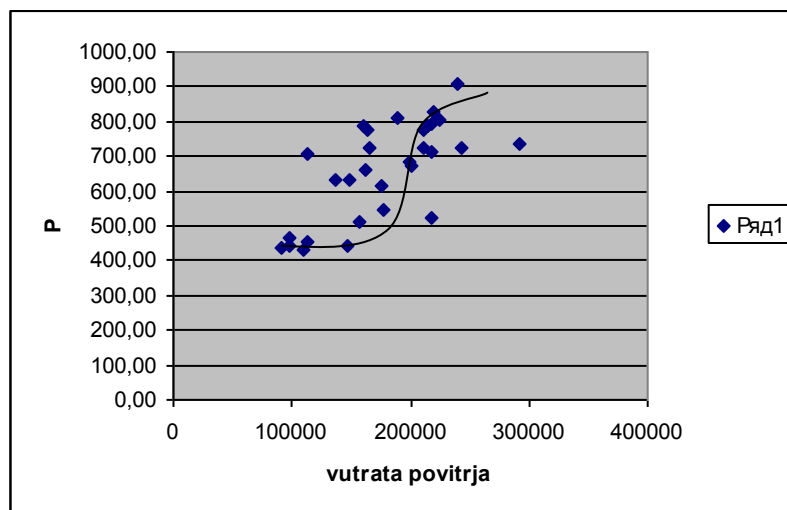


Рисунок 3.6 – Точковий графік залежності  $P(\rho)$

Приймаючи до уваги тенденцію залежності більшості точок, зробимо припущення, що це експоненціальна регресія вигляду:  $y = be^{k/x}$  ( за умови, що  $k < 0$  ця функція має вигляд рисунок 3.7).

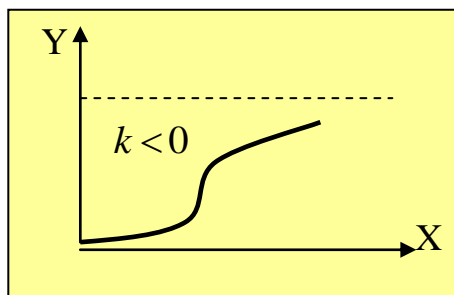


Рисунок 3.7 – Графічний вигляд функції  $y = be^{k/x}$

Проте аналогічно попереднім двом випадкам, перевіримо декілька наявних функцій, що можуть описувати точковий графік, щоб підтвердити або спростувати наше припущення:

1. Експоненціальна регресія вигляду:  $y = b * e^{k/x}$ ;  $y = 1042e^{-79945/x}$ ;  
 $\bar{A} = \frac{1}{31} 3,645 * 100\% = 11,76\%$ .

2. Степенева регресія:  $y_x = 0,147 \times x^{0,696}$ ;  $\bar{A} = \frac{1}{31} 3,78 * 100\% = 12,19\%$ .

3. Експоненціальна регресія:  $y_x = e^{5,872 + 0,000003x}$ ;  $\bar{A} = \frac{1}{31} 4,286 * 100\% = 13,82\%$ .

4. Гіперболічна регресія вигляду  $y_x = \frac{1}{\frac{a}{x} + b}$ ;  $y_x = \frac{1}{\frac{160,7}{x} + 0,0006}$ ;

$\bar{A} = \frac{1}{31} 3,689 * 100\% = 11,9\%$ .

У результаті перебору інших функцій, що мають вигляд :

$y_x = a_0 \times a_1^x$  (для нашого випадку  $y_x = 10^{35} \times 0,99^x$ ),

$y_x = a_0 + a_1 \ln x$  ( для нашого випадку  $y_x = 1961339 - 162690 \ln x$  ),

$y = ae^{kx}$  ( для нашого випадку  $y = 2,92e^{-1,1 \cdot 10^{-6}x}$ ), а також прямолінійної

характеристики, отримуємо неприпустимо велике значення похибки апроксимації.

Порівнюючи похибки апроксимації у розглянутих випадках, бачимо, що припущення справдилося. Тому обираємо першу характеристику (вигляду  $y = b * e^{k/x}$ ).

Оскільки метою є побудова багатфакторної моделі, потрібно знайти спосіб, за допомогою якого можна було б представити розраховані залежності електричної потужності від усіх розглянутих вище факторів. Бачимо, що для кожного із трьох факторів характеристика має нелінійний вигляд. Тому вводимо ці характеристики в модель, виконуючи заміну факторів до лінійного вигляду. Багатфакторна модель матиме вигляд:  $y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$ .

Розглянемо, яким чином можна виконати заміну для кожної з отриманих характеристик:

1. Для  $P(t)$  характеристики вигляду  $\hat{y}_x = a + b/x$  заміна до лінійного вигляду приймає вигляд:  $y_1 = y_t$ ;  $x_1 = \frac{1}{x_t}$ .

2. Для  $P(p)$  характеристики вигляду  $y_x = \frac{1}{ke^{-x} + b}$  заміна до лінійного вигляду матиме вигляд:  $y_2 = \frac{1}{y_p}$ ;  $x_2 = -\ln x_p$ .

3. Для  $P(\rho)$  характеристики вигляду  $y = be^{k/x}$  заміна до лінійного вигляду приймає вигляд:  $y_3 = \ln y_\rho$ ;  $x_3 = \frac{1}{x_\rho}$ .

Після приведення до лінійної заміни характеристик  $P(t)$ ,  $P(p)$  і  $P(\rho)$  їх можна звести у єдине рівняння багатфакторної регресії, складаючи усі значення масивів потужностей в одній частині рівняння та всі значення масивів факторів із відповідними коефіцієнтами в іншій частині рівняння. Загальне рівняння залежності потужності від усіх трьох факторів прийматиме вигляд:

$y_1 + y_2 + y_3 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$ , або, беручи до увагу заміну, маємо:

$$y_t + \frac{1}{y_p} + \ln y_\rho = a_0 + a_1 \frac{1}{x_t} + a_2 (-\ln x_p) + a_3 \frac{1}{x_\rho}.$$

Вирішуючи дане рівняння методом найменших квадратів, отримуємо наступні значення коефіцієнтів:

$$\begin{cases} a_0 = 240,4 \\ a_1 = 1902,5 \\ a_2 = -251,4 \\ a_3 = 0,413 \end{cases}$$

тобто рівняння багатофакторної регресії приймає вигляд:

$$y = 240,4 + 1902,5x_1 - 251,4x_2 + 0,413x_3.$$

Аналогічно випадкам з однофакторною регресією розраховуємо середню похибку апроксимації для даного рівняння:  $\bar{A} = \frac{1}{31} 4,825 * 100\% = 15,56\%$ .

Наступним критерієм, за допомогою якого ми будемо оцінювати величину впливу факторів на електричну потужність, є індекс багатофакторної кореляції, тобто показник, що визначає тісноту спільного впливу факторів на величину, що розглядається. Індекс багатофакторної кореляції можна застосовувати для оцінки моделей як лінійних, так і нелінійних видів зв'язку [35, 36]. За формулою (3.20) для моделі  $P(t, p, \rho)$  визначаємо, що індекс багатофакторної кореляції складає:  $\rho_{P(t, p, \rho)} = 0,582$ .

Аналогічним чином, визначимо тісноту впливу факторів на електричну потужність, вилучаючи по одному фактору з моделі, щоб перевірити: скільки факторів і яких саме найкраще відображають зв'язок із величиною  $P$ .

Попередньо проаналізувавши величину міжфакторної кореляції, було визначено, що між виробничим тиском і питомою витратою повітря існує достатньо тісний лінійний зв'язок, тобто лінійний коефіцієнт парної кореляції дорівнює 0,77. Це більше, ніж вплив кожного з цих факторів на потужність окремо: для потужності та виробничого тиску цей показник складає:  $r_{(P; p)} = 0,523$ , для потужності і питомої витрати повітря:  $r_{(P; \rho)} = 0,707$ .

Бачимо, що не можна включати в єдину модель і виробничий тиск, і питому витрату повітря, оскільки їх взаємний зв'язок спотворює загальний вплив факторів

на електричну потужність. Тому потрібно розглянути випадки наявності у моделі кожного з них окремо, тобто модель прийматиме вигляд або  $P(t, p)$ , або  $P(t, \rho)$ :

1. Визначаємо модель вигляду  $P(t, p)$ :

Аналогічно попереднім розрахункам, користуючись методом найменших квадратів визначаємо невідомі коефіцієнти моделі:

$$\begin{cases} a_0 = 226,8 \\ a_1 = 1313,7 \\ a_2 = -281,6 \end{cases}$$

Рівняння приймає вигляд:  $y = 226,8 + 1313,7x_1 - 281,6x_2$ .

Знаходимо середню похибку апроксимації:  $\bar{A} = \frac{1}{31} 4,714 * 100\% = 15,2\%$ , а також індекс багатofакторної кореляції:  $\rho_{P(t,p)} = 0,596$ .

2. Визначаємо модель вигляду  $P(t, \rho)$ :  $y = 625,5 + 784,8x_1 - 183457x_2$ .

Знаходимо середню похибку апроксимації:  $\bar{A} = \frac{1}{31} 6,66 * 100\% = 19,55\%$  та індекс багатofакторної кореляції:  $\rho_{P(t,\rho)} = 0,1$ .

Отже, бачимо, що кращою з двох розглянутих моделей, згідно індекса багатofакторної кореляції, є модель (1) вигляду  $P(t, p)$ ;  $P = 226,8 + 1313,7t - 281,6p$ .

Проведемо оцінку адекватності обраної моделі за допомогою  $F$ -критерія Фішера. Перевіримо гіпотезу про несуттєвість моделі  $y = 226,8 + 1313,7t - 281,6p$ . Для цього виконаємо порівняння значень  $F_{fakt}$  та  $F_{tabl}$ . Для цього випадку  $F_{tabl}(1; 28; 0,95) = 4,17$ .

$F_{fakt}$  визначається із співвідношення значень факторної та залишкової дисперсії, розрахованих на одну степінь свободи. За формулою (3.22):

$$F_{fakt} = \frac{0,356}{1 - 0,356} * \frac{28}{2} = 7,739.$$

Отже,  $F_{tabl} < F_{fakt}$ , тобто гіпотеза про випадковість оцінюваних характеристик відхиляється і визнається їх статистична значимість і надійність. Побудована модель є адекватною.

Аналогічно випадку із однофакторною регресією, маючи параметри технологічного процесу, можна встановити межі довірчого інтервалу для характеристики і визначити планові величини енергоспоживання для відповідного періоду часу. Таким інтервалом є наступний місяць, а параметрами технологічного процесу ті ж самі параметри – температура повітря у виробничому приміщенні та виробничий тиск для даного місяця. Довірчий інтервал будуємо за формулою для індивідуальних значень функції відгуку наявної математичної моделі, оскільки інтервал визначення планових величин потужності є таким самим, як і той, на базі якого було побудовано модель, а це тридцять одне значення щодобової електричної потужності та параметрів технологічного процесу.

Для визначення планового значення електричної потужності на наступний місяць вводимо дані щодо температури і тиску в отриману формулу  $P = 226,8 + 1313,7t - 281,6p$ , попередньо виконавши заміну:

$$\begin{cases} p = -\ln p_{fakt} \\ t = \frac{1}{t_{fakt}} \end{cases}$$

де  $p_{fakt}$ ,  $t_{fakt}$  - відомі параметри тиску і температури на наступний місяць.

Розраховане значення електричної потужності за даною моделлю для  $p_{fakt} = 2,48$  техн. атм,  $t_{fakt} = 20$  °С становить:

$$P = 226,8 + 1313,7 * 0,05 + 281,62 * 0,9082.$$

Для визначення довірчого інтервалу для моделі багатофакторної регресії застосуємо формулу:

$$P(p) = P_{розр}(p) \pm T\left(\frac{\alpha}{2}, f_e\right) \cdot S_e \cdot \sqrt{1 + [X^T(p)][D][X(p)]} \quad (3.28)$$

де  $[X(p)]$  - матриця значень незалежних змінних (факторів), які використовуються у математичній моделі;

$[X^T(p)]$  - транспонована матриця  $[X(p)]$ ;

$[D]$  - коваріаційно-дисперсійна матриця вектора параметрів (констант) рівняння математичної моделі.

Оскільки багатофакторні математичні моделі неможливо побудувати графічно (якщо факторів більше двох), то доцільною є побудова зміни величини електроспоживання у часі. Довірчі інтервали, побудовані у такій системі координат для відповідних багатофакторних лінійних регресійних моделей, можуть бути представлені у вигляді області, обмеженої ламаними лініями, всередині якої з імовірністю  $p$  знаходяться значення фактичних витрат енергії на досліджуваному об'єкті при існуючому рівні ефективності енерговикористання.

Для багатофакторної математичної моделі електроспоживання для першої доби наступного місяця визначаємо верхню та нижню границі довірчих інтервалів до розрахункових значень електричної потужності. Розрахунки проводимо згідно формули за допомогою електронних таблиць *MSExcels*.

Приклад розрахунку виконаємо для першого значення, для якого отримані наступні дані:

$$T = 20^{\circ}\text{C}, \quad p = 2,48 \text{ (техн. Атм)}, \quad P_{\text{факт}} = 773,8 \text{ кВт.}$$

Для рядів значень факторів, за якими було побудовано математичну модель електроспоживання, обчислюємо значення коваріацій за формулою:

$$\text{cov}(a, b) = \frac{1}{31} \sum_{j=1}^{31} (a - a_{\text{сеп}})(b - b_{\text{сеп}}), \quad (3.29)$$

дістанемо:

$$\text{cov}(T, T) = 36,96,$$

$$\text{cov}(T, p) = 1,56,$$

$$\text{cov}(p, p) = 1,34.$$

Тоді інформаційна матриця записується у вигляді:



$$M = \begin{pmatrix} 36,96 & 1,56 \\ 1,56 & 1,34 \end{pmatrix},$$

а обернена до неї матриця матиме вигляд:

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} 0,0284 & -0,0331 \\ -0,0331 & 0,7848 \end{pmatrix},$$

і коваріаційно-дисперсійна матриця визначатиметься наступним чином:

$$D = \frac{1}{31} M^{-1} = \begin{pmatrix} 0,00092 & -0,00107 \\ -0,00107 & 0,0253 \end{pmatrix}.$$

Матриця факторів для першого значення вихідних даних:

$$X = \begin{pmatrix} 20 \\ 2,48 \end{pmatrix}, \text{ транспонована матриця факторів: } X^T = (20; 2,48).$$

Середньоквадратичне відхилення фактичних значень електроспоживання від розрахункових, отриманих за допомогою математичної моделі, становить:

$$S_e = 111,86.$$

Значення коефіцієнту Стюдента для ступенів свободи  $f_e = 31 - 1 = 30$  та рівня статистичної значимості  $\alpha = 0,95$  становитиме  $T\left(\frac{\alpha}{2}, f_e\right) = 2,0423$ .

Згідно формули (3.28) дістанемо:

верхня межа довірчого інтервалу для електричної потужності при першому значенні даних:

$$P_{verh} = 548,3 + 2,0423 \times 111,86 \sqrt{1 + (20 \quad 2,48) \times \begin{pmatrix} 0,00092 & -0,00107 \\ -0,00107 & 0,0253 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 20 \\ 2,48 \end{pmatrix}} = 820,3,$$

нижня межа довірчого інтервалу для тієї ж величини електричної потужності:

$$P_{nujn} = 548,3 - 2,0423 \times 111,86 \sqrt{1 + (20 \quad 2,48) \times \begin{pmatrix} 0,00092 & -0,00107 \\ -0,00107 & 0,0253 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 20 \\ 2,48 \end{pmatrix}} = 276,3.$$

Проміжні розрахунки та результати обчислення границь довірчого інтервалу для інших значень фактичного електроспоживання наведені у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Визначення ширини довірчого інтервалу для значень електричної потужності

№ п/п	Фактори		Значення функції		Розрахунок границь довірчих інтервалів				
	$T_{fakt}$	$P_{fakt}$	$P_{факт}$	$P_{розр}$	$X_T \cdot D \cdot X$	$T_{за min}$	$P_{за min}$	$P_{верх}$	$P_{нижн}$
1	20	2,48	773,8	548,3	0,417	0,05	-0,908	820,3	276,3
2	20	2,05	695,6	494,6	0,386	0,05	-0,718	763,5	225,7
3	18	2,16	525,0	515,9	0,333	0,055	-0,77	779,6	252,1
4	10	2,33	590,2	596,4	0,179	0,1	-0,846	844,4	348,4
5	10	4,90	566,3	805,9	0,595	0,1	-1,59	1094,4	517,4
6	10	3,43	766,6	704,5	0,316	0,1	-1,23	966,6	442,5
7	10	3,22	715,3	687,4	0,285	0,1	-1,169	946,4	428,4
8	10	3,10	696,8	676,4	0,269	0,1	-1,13	923,5	419
9	10	3,00	651,8	667,6	0,255	0,1	-1,099	923,5	412
10	10	2,76	655,7	643,9	0,226	0,1	-1,015	896,9	391
11	17	4,00	773,8	694,6	0,525	0,059	-1,386	976,6	412,6
12	20	3,30	695,6	628,7	0,502	0,05	-1,194	908,7	348,7
13	19	3,40	686,1	641	0,486	0,053	-1,224	919,5	362,5
14	19	3,60	714,0	657,2	0,514	0,053	-1,281	938	376
15	19	3,73	721,5	667	0,532	0,053	-1,316	949,8	384,2
16	19	2,90	481,4	596	0,427	0,053	-1,065	869	323
17	19	2,78	528,1	584	0,415	0,053	-1,022	856	312
18	25	3,23	534,4	609,4	0,666	0,04	-1,172	903,9	314
19	35	5,35	494,4	735,8	1,45	0,028	-1,677	1093,4	378,2
20	35	2,60	568,5	532,5	1,1	0,028	-0,955	863,5	201,5
21	41	3,00	527,7	568	1,51	0,024	-1,1	929,9	206,1
22	41	3,40	613,1	601,9	1,54	0,024	-1,22	966	237,9
23	41	3,82	649,3	635,7	1,58	0,024	-1,34	1002,7	268,7
24	41	2,58	550,4	525,3	1,49	0,024	-0,948	885,8	164,8
25	38	3,60	740,5	621,4	1,36	0,026	-1,28	972,4	270,4
26	38	3,60	633,6	621,4	1,36	0,026	-1,28	972,4	270,4
27	33	4,00	652,0	656,5	1,124	0,03	-1,386	989,5	323,5
28	33	4,00	508,6	656,5	1,124	0,03	-1,386	989,5	323,5
29	38	3,60	623,0	621,7	1,364	0,026	-1,281	972,9	270,5
30	38	4,13	708,1	661	1,424	0,026	-1,42	1016,7	305,3
31	38	4,40	633,6	677,7	1,46	0,026	-1,48	1036	319,4

### **Висновки до розділу 3**

1. Для встановлення обґрунтованого «стандарту» енергоспоживання в системах контролю, перш за все, необхідно визначити чинники, які найбільш суттєво впливають на зміну обсягів споживання енергії. З цією метою були проаналізовані декілька методів відбору чинників. Для визначення необхідного кола чинників найбільш доцільним є метод експертних оцінок. Для покращення процедури розрахунку, варто зазначити не присвоювати незначним, на думку експертів, факторам нульові значення, оскільки це ускладнює процедуру обробки даних.

2. Після визначення складу факторів, що впливають на процес енергоспоживання, необхідно знайти вид зв'язку, що відображає залежність між даними величинами, тому було проаналізовано різні математичні методи побудови моделей.

3. Найбільш доцільно для побудови «стандартів» енергоспоживання в системах контролю використовувати багатфакторний регресійний аналіз, при цьому обов'язково досліджувати характер і вигляд залежності змінних від споживання енергії.

4. Оскільки будь-яка математична модель має залишкову похибку, то для визначеного «стандарту» енергоспоживання необхідно встановити межі довірчого інтервалу для характеристики і визначити планові величини енергоспоживання для відповідного періоду часу.

## РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

У даному розділі проведено аналіз стартап проекту для визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямків реалізації цього впровадження. Даний розділ оформлений у відповідності з [47].

### 4.1 Опис ідеї проекту

Проектом даного стартапу є програмний продукт для проведення контролю і планування споживання енергоресурсів на підприємствах для технологічних процесів, пристроїв, систем та інших сгрупованих споживачів.

Назва проекту «Побудова і впровадження систем оперативного контролю енергоспоживання».

Дана програма призначена для оцінювання і контролю результатів енергозбереження після впровадження заходів з енергоефективності та енергозбереження на підприємстві на основі проведення математичних та статистичних таких процедур:

1. Методика скорочення тривалості збору та оброблення даних для побудови систем контролю;
2. Визначення оптимального періоду контролю результатів енергозбереження;
3. Визначення відповідних чинників, що найбільш суттєво впливають на зміну обсягів енергоспоживання;
4. Побудова «стандартів» енергоспоживання в системах контролю за допомогою багатofакторного регресійного аналізу із дослідженням характеру і вигляду залежності змінних від споживання енергії.
5. Встановлення меж довірчого інтервалу для «стандарту» енергоспоживання і визначення планових величин енергоспоживання для відповідного періоду часу.

Програма знаходиться на стадії розробки, технологічні інструменти розробника вказані в табл. 4.3. Методологічною основою для створення

математичних операцій, графіків, функцій та запропонованих дій в певних ситуаціях контролю стала теоретична основа методики, детально описана у розділах 2 і 3 даної дисертації.

Група споживачів, для якої створюється даний продукт, описана у табл. 4.14 та 4.15.

В табл. 4.1 представлене цілісне уявлення про зміст та можливості проекту, а також про можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Побудова програмного продукту, що дозволить проводити оперативний контроль ефективності енерговикористання на технологічних об'єктах	1. Комерційний – предоставлення послуг промисловим підприємствам	1. Підвищення рівня енергетичної ефективності 2. Збільшення конкурентоспроможності на ринку
	2. Навчальний – використання продукту студентами енергетичних спеціальностей	1. Набуття студентами навичок проведення оперативного контролю 2. Підвищення кваліфікації молодих кадрів у сфері енергоефективності
	3. Співтоваристський – представлення програмного продукту підприємствам енергетичних спеціальностей в якості співпраці	1. Підвищення кваліфікації представників енергетичної галузі 2. Вигідні економічні заручення між підприємствами

В табл. 4.2 описаний аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№, п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні конкуренти				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Системи цільового моніторингу	Системи питомих норм енергоспоживання	Автоматизовані системи прогнозування цільових функцій			
1	Надійність системи	1	2	3	4		1,2,4	3
2	Глобальність	1	2	3	4	3	2,4	1
3	Комплексність	1	2	3	4	2,3	4	1
4	Оперативність	1	2	3	4	3	1,2	4
5	Достовірність	1	2	3	4	3	1,2	4

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

#### 4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного етапу проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Визначення технологічної здійсненності проекту представлено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№, п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	База для потенційних даних	PyQt4	Наявні	Потрібно доробити
2	Математична складова	Python Math	Наявні	Потрібно розробити
3	Графічна складова	Python, Blender	Наявні	Доступні

Проект можливо реалізувати, усі необхідні технологічні ресурси знаходяться у вільному доступі, у тому числі методичні рекомендації з проведення оперативного контролю ефективності використання енергоресурсів, на основі яких буде створена математична основа продукту і які детально описані в розділах 2 і 3.

#### 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В даному розділі визначено ринкові можливості, що можуть бути використані під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту. Сплануємо напрями розвитку проекту з урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів конкурентів.

Аналіз динаміки та розвитку попиту на проект проведено та представлено результат у табл. 4.4

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку  
стартап-проекту

№, п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	24
2	Загальний обсяг продаж, грн./ум. од	1300
3	Динаміка ринку	стагнує
4	Наявність обмежень для входу	обмежений. Дана система ще не використовується в Україні на необхідному рівні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандарт ISO 50001
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	14

Ринок має середню ступінь привабливості для входження. Середня норма рентабельності досить велика, а відсутність подібних систем робить проект досить

ризикованим з точки зору впровадження на ринок. У табл. 4.5 визначені основні групи клієнтів стартапу та їх характеристика.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№, п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Підвищення енергетичної ефективності	Будь яка група споживачів	Не передбачено	Надійність, ефективність, доступність

Аналіз ринкового середовища з точки зору загроз та можливостей представлено у табл. 4.6, 4.7.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№, п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Ціна на послуги	Інформаційні ресурси, а саме їх розробка коштує значних коштів	Система Free to Play, яка частіше використовується на ринку відеоігр, але рідше і у сфері програмного забезпечення
2	Оновлення програми	Для того, щоб проект функціонував, необхідно постійно підтримувати експлуатацію програми та серверу	Створити відповідального за технічний стан програми. Анонсувати оновлення
3	Недостатня мотивація споживача	Системи оперативного контролю на українському ринку є інновацією і для клієнта досить ризиково використовувати дану послугу	Реклама, комунікативні методи зв'язку з потенційними клієнтами



Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№, п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Новизна	Досить свіжий погляд у сфері енергоринку України	Рекламувати продукт як інноваційний
2	Комплексність	Розрахунок ведеться аргументований та різносторонній. Інші подібні системи не мають на стільки комплексної системи висновків та пропозицій	Постійний контроль за справністю математичної складової продукту
3	Простота експлуатації	Система підказок та навчального режиму дозволить кожному оволодіти цією програмою	Удосконалення даної складової

Загальні риси конкуренції на ринку представлені у табл. 4.8

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства( можливі дії компанії, щоб бути конкурентноспроможною
1	2	3
1. Тип конкуренції - чиста	Програми планування та контролю вже давно існують, як і статистичні методики	Маркетинговий відділ сприятиме інформаційному уклону саме в комплексність програми
2. Локальний рівень конкурентної боротьби	За межами України вже існують системи оперативного контролю, конкурувати за кордонами України нерентабельно	Розвиватись та шукати шляхи вирішення даної проблеми
3. Потенційно міжгалузева	Дана система може використовуватись і для контролю якості продукції	На певному етапі підприємство буде намагатись вийти за межі власної галузі

Продовження таблиці 4.8

1	2	3
4. Нецінова конкуренція	Даний продукт не матиме фіксованої ціни	На ціну впливатимуть безліч факторів
5. Марочна	На певних енергетичних підприємствах уже працюють певні системи аналізу та контролю	Ситуацію зможе вирішити лише жорстка конкуренція та безкомпромісні дії зі сторони підприємства

З огляду на конкурентну ситуацію проект може існувати на ринку інформаційних та енергетичних послуг за умови надійності та регулярного інформаційного забезпечення товару, а також за умови постійного покращення та аналізу попиту на власні послуги та послуги товарів заміників(аналогів).

На основі аналізу конкуренції, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. 4.6; 4.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз сформовано у табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Новизна	Конкурентна середа не має аналогів продукції, що випускає компанія
2	Аргументованість результатів	Програма надає клієнту аргументовані висновки та рекомендації
3	Простота використання	Кожний клієнт має можливість використання даного продукту без використання спеціальних додаткових ресурсів

Аналіз сильних та слабких сторін проекту представлено у табл. 4.10. Аналіз здійснено на основі аналізу табл. 4.9.

Таблиця 4.10 – Порівняльний аналіз сильних та слабих сторін

## «Системи оперативного контролю енергоспоживання»

№, п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «Системи оперативного контролю енергоспоживання»						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Гнучкість використання	5						V	
2	Термін розробки	3		V					
3	Оновлення	4			V				
4	Корисність на ринку	6					V		
5	Експлуатація	5		V					
6	Ціна	3			V				
7	Новизна	3						V	

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза). Результат проведення SWOT-аналізу представлено у табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
1	2
Високий попит на підвищення енергоефективності Новизна проекту – відсутність аналогів Простота використання проекту Підтримання сучасній Європейських «трендів»	Необхідність великої бази даних, що значно зменшую потенційну надійність програмного продукту Новизна проекту – багато ризиків Висока вартість послуг представників галузі інформаційних технологій Низький рівень кваліфікованих фахівців в даній сфері господарства

Продовження табл. 4.11

1	2
Можливості	Загрози
Позитивна тенденція росту популярності концепції контролю та планування в Україні та Європі Розвиток законодавчого регулювання проблеми енергоефективності в країні	Зростання конкуренції Політична ситуація в країні Висока вартість регулярного забезпечення та оновлення продукту

На основі SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів представлені у табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№, п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Використання Демо-версії програми	Досить низька через велику кількість систем для взлому демо-програм	3 роки
2	Free to Play	Вище середнього. Повністю залежить від якості продукції	2 роки
3	Спільна робота з іншими підприємствами	Середня. Залежить частинно від якості продукції, частинно від співробітництва з іншими підприємствами	2 роки

#### 4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Опис цільових груп споживачів представлено у таблиці 4.13.

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№, п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
1	Промислові підприємства	Залежить від рекламних заходів	Залежить від поведінки компанії	Середня	Низька
2	Підприємства енергетичної сфери	Помірна	Високий	Висока	Середня
3	Вищі навчальні заклади	Помірна	Середній	Низька	Середня
Обрані цільові групи: Промислові підприємства					

Базова стратегія розвитку стартап-проєкту визначена та представлена у табл. 4.14.

Таблиця 4.14 – Визначення базової стратегії розвитку

№, п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Free to Play	Концентрація основних зусиль не на продажу товару, а на захопленні визнання «продукту»	Інформаційні, комунікаційні система, взаємодія з підприємствами, які належать до енергетичної галузі	Концентрований маркетинг

На основі обраної базової стратегії розвитку проводиться вибір стратегії конкурентної поведінки проєкту. Результати представлені у табл. 4.15.

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і як?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Проект є першопрохідцем на ринку	Компанія буде шукати нових споживачів	Не буде, так як продукція компанії поки що не має аналогів	Стратегія заняття конкурентної ніші

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розроблена стратегія позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект. Результати представлені у табл. 4.16.

Таблиця 4.16 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту
	Надійність товару Виправдовування очікувань Швидке реагування на реакцію цільової аудиторії	Збір відгуків про товар. Покращення та реклама товару до моменту рентабельності	Унікальність – як стратегії розвитку, так і самого продукту.	Інтелектуальний Простий Ефективний Майбутнє Покращення

#### 4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Визначення ключових потенційних переваг проекту представлено у табл. 4.17.

Таблиця 4.17 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Висока плата за електроенергію	Постійний моніторинг рівня енергоефективності	Допомога в прийнятті рішень
2	Низька ступінь керування попитом на електроспоживання	Дозволяє виявити, які фактори найбільше впливають на електроспоживання	Управління електроспоживанням

Трирівнева маркетингова модель потенційного товару представлена у табл. 4.18.

Таблиця 4.18 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
1.Товар за задумом	Проведення процедури оперативного контролю на технологічних об'єктах
2.Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики
	1. Великий простір для потенційної бази даних
	2. Графічний інтерфейс з можливістю копіювання даних з MS Excel та подальшого використання
	3. Велика база даних статичних величин всередині програми
	4. Частина даних збережена на сервері, до якого у програми буде доступ через інтернет
	Якість: нормативи проведення статистичних розрахунків, параметри тестування, відгуки
	Пакування – скачування з офіційного сайту
	Марка: XenderSystems + Системи оперативного контролю енергоспоживання
Товар із підкріпленням	До продажу – оформлення гарантійного листа, консультація

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів. Результати даного заходу представлено у таблиці 4.19.

Таблиця 4.19 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на послугу
	150-200 грн.	300-700 грн.	Залежить від обраного підприємства	Безкоштовно-500грн.

В табл. 4.20 представлений аналіз визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення.

Таблиця 4.20 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Отримання товару із рук довіреної енергетичної компанії, через яку клієнт виходить до виробника	Продавати товар, рекламувати виробника товару	Дво-трьорівневий	Залучена

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для



позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів. Результат сформульовано у табл. 4.21.

Таблиця 4.21 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Недовіра до продавця, потреба в перевірці.	Інтернет	Контроль, планування Простий Надійний Точний	Виклик випробувати продукт. Завоювання довіри	Контроль ефективності енерговикористання. Навіщо переплачувати гроші. Зараз, або ніколи!

Подальша імплементація проекту доцільна тільки якщо проект буде у надійних кваліфікованих руках та якщо будуть виконуватись заплановані умови використання проекту, так як даний проект має занадто слабку систему захисту від раптових ризиків. Короткий маркетинговий план проекту представлений у табл. 4.22

Таблиця 4.22 – Маркетинговий план проекту

	Об'єкт	Мета	Термін	Можливості	Кількість	Суб'єкти ринку
Ідея	Програний продукт для проведення оперативного контролю ефективності енерговикористання на виробничих підприємствах	Контроль та планування енерговикористання, підвищення попиту на продукцію.	Продукт розроблятиметься 3 місяці, 3 місяці буде термін випробувань та реклами, продукт буде готовий вийти на ринок у період 0,5 -1 рік	Статистичні та математичні методи дозволять споживачу контролювати обсяг споживання енергоресурсів. Більш детальна інформація описана в розділах 2 і 3.	Обсяг продажу буде залежати цілком від попиту та реклами, тому перший період терміном від 3-х місяців то 1 року буде випробувальним.	Товар орієнтовано на начальників, або енергоменеджерів виробничих підприємств та інших фізичних осіб, зацікавлених у підвищенні енергоефективності виробничого підприємства
Ціна	До 1500 гривень за одиницю продукції	Ціна буде залежати від багатьох умов, особливо від умов використання кінцевого продукту	Ціна буде актуальна до тих пір доки не з'явиться більш дешевих товарів-аналогів	З часом ціна буде коливатись залежно від версії продукту та наявності конкурентів.	Ціна буде встановлюватись в залежності від версії продукту. Також буде плата за додаткове ліцензування.	Ціна також буде залежати від групи покупців. Посередники та покупці, які зможуть запропонувати ін.ший вид вигоди матимуть знижку, або отримають продукт по партнерській програмі
Місце продажу	Інтернет ресурси, офіційний сайт, посередники	Такі канали розповсюдження вибрані як найоптимальніші для подібних систем.	Покупці будуть обирати канал збуту після того, як товар отримає довіру	Канали розповсюдження будуть працювати лише після проведення рекламних заходів та створення офіційного сайту, проведення ліцензування продукту.	Кошти будуть витрачатись на адміністрацію сайту та анонсування і розробку нових версій продукту	Покупці зможуть отримати продукт або з офіційного сайту, або через офіційних представників
Реклама	Види реклами: «search engines optimization» - оптимізація через пошукові системи. Використання демо версій в якості проби продукту	Така реклама дозволить користувачам швидше знаходити шлях до виробника, також опробувати продукт на рівень якості та доцільності	Часові рамки: 0,5 років - підготовка, 1 рік - реклама, 3 роки – срок життя проекту	Реклама буде здійснюватись через партнерські програми та використання пошукових систем	Рекламні заходи будуть коштувати 40 % від капітальних затрат	Фізичні особи зможуть отримати інформацію з допомогою статей та анонсів, розповсюджених на енергетичних форумах та журналах

## **Висновки до розділу 4**

1. Проведений маркетинговий аналіз стартап проекту «Системи оперативного контролю енергоспоживання» дозволяє визначити принципові можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації його застосування. Був проведений технологічний аудит ідеї проекту, аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту, розроблена ринкова стратегія впровадження проекту та ринкова (маркетингова) програма проекту.

2. Даний проект має можливість бути комерціалізованим, але в певній мірі з певними особливостями (демо версія продукту, партнерські угоди). Попит на проект наявний, динаміка ринку помірна, трохи нижче середнього рівень рентабельності роботи на ринку, у порівнянні з іншими можливими проектами.

3. Перспективи впровадження є і досить значні. Традиційна система контролю і планування енергоспоживання має певні недоліки, які даний продукт міг би вдосконалити. Бар'єром входження може бути недовіра споживача та низький початковий капітал. Стан конкуренції – помірний, конкурентоспроможність проекту досить висока, особливо на перших етапах.

4. Альтернативним варіантом впровадження можна вважати так названу систему Free to Play, або використання партнерських програм, та демо-версій продукту. Подібні заходи можуть зменшити рівень сукупного доходу на перших етапах, але дозволять збільшити попит на послуги проекту.

## ВИСНОВКИ

1. Системи контролю і планування енергоспоживання є іншим підходом до оперативного контролю та управління ефективністю енерговикористання. Такі системи є складовою частиною системи енергетичного менеджменту на будь-якому промисловому чи комерційному об'єкті. Традиційні системи контролю і планування енергоспоживання мають певні недоліки, які потребують удосконалення.

2. На реальних виробничо-господарських об'єктах є необхідність у побудові десятків систем оперативного контролю і тому запропоновано методику скорочення тривалості побудови таких систем. Запропонована методика скорочення тривалості побудови систем контролю енергоспоживання для технологічних об'єктів, що базується на попередньому встановленні «стандартів» енергоспоживання для мінімальної періодичності контролю, яка дорівнює одній годині, дає можливість вже через одну або кілька діб після початку збору вихідних даних здійснювати контроль ефективності використання палива або енергії на об'єкті, що розглядається. Така методика одночасно з контролем енергоефективності, що систематично здійснюється з мінімальною періодичністю, передбачає виконання певної процедури одержання та обробки нових вихідних даних, яка дозволяє поступово, не перериваючи процесу контролю, встановлювати «стандарти» енергоспоживання для більш тривалих періодів (доба, тиждень, місяць тощо).

3. Розроблений алгоритм послідовного переходу від меншої до більш тривалої періодичності контролю ефективності енерговикористання суттєво скорочує час, необхідний для створення систем контролю і планування енергоспоживання на будь-якому технологічному об'єкті, а також дає можливість у подальшому визначати для цього об'єкту оптимальний період контролю енергоефективності.

4. Запропоновано методику визначення оптимального періоду контролю енергоефективності, найдоцільнішого з технологічної та економічної точки зору інтервалу часу між двома найближчими перевірками виконання встановленого «стандарту», що визначається за допомогою економічно-фінансового аналізу

визначення вартості ймовірних втрат електричної енергії і фінансових витрат на проведення контролю.

5. Для встановлення обґрунтованого «стандарту» енергоспоживання в системах контролю більш доцільно використовувати багатофакторний регресійний аналіз, при цьому обов'язково досліджувати характер і вигляд залежності змінних від споживання енергії, а також оскільки будь-яка математична модель має залишкову похибку, то для визначеного «стандарту» енергоспоживання необхідно встановити межі довірчого інтервалу для характеристики і визначити планові величини енергоспоживання для відповідного періоду часу.

6. Проведені дослідження дали змогу сформулювати стартап проект у фомі розроблення програмного забезпечення «Системи оперативного контролю енергоспоживання» Даний проект має можливість бути комерціалізованим, але в певній мірі з певними особливостями (демо версія продукта, партнерські угоди). Попит на проект наявний, динаміка ринку помірна, трохи нижче середнього рівень рентабельності роботи на ринку, у порівнянні з іншими можливими проектами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Приступа М.М. Енергозбереження в Україні: правові аспекти і практична реалізація [Текст] / М.М. Приступа, М.В. Бохонко. – Рівне: видавець О.Зень, 2011. – 56 с.
2. Ковалко М.П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України [Текст] / М.П.Ковалко, С.П. Денисюк. – К.: УЕЗ, 1998. – 506 с.
3. Находов В.Ф. Энергосбережение и проблема контроля эффективности энергоиспользования [Текст] / В.Ф. Находов // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро: інформ. зб. – 2007. - №1. – С. 34-42.
4. Шульга Ю.І. Досвід державного управління енергозбереженням в Україні / Ю.І. Шульга // Енергоефективність – 2002 : міжнар. наук.-техн. конф., 29–30 жовтня 2002 р. : тези доп. – К., 2002. – С.13–20.
5. Жовтянський В.А. Результативність енергозбереження в Україні / В.А. Жовтянський, М.М. Кулик, Б.А. Костюковський // Енергоефективність – 2002 : міжнар. наук.-техн. конф., 29–30 жовтня 2002 р. : тези доп. – К., 2002. – С.94–95.
6. Праховник А.В. Контроль ефективності енерговикористання – ключова проблема управління енергозбереженням / А.В. Праховник, В.Ф. Находов, О.В. Бориченко // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2009. – №8(66). – С. 41–54.
7. Находов В.Ф. Аналіз діючих в Україні методик нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, К.К. Кочетова // «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро : інформ. зб. – 2007. – №2. – С. 42–48.
8. Праховник А.В. Энергетический менеджмент: Учебное пособие [Текст] /А.В. Праховник, В.П. Розен, О.Б. Разумовский.- К.: Нот.ф-ка, 1999. – 184 с.
9. Праховник А.В. Энергетический менеджмент [Текст] / А.В Праховник, А.И. Соловей, В.В. Прокопенко. – К.: Киевская нотная фабрика, 2001. – 472 с.

10. Материалы проекта «Усиление действий по подготовке энергоменеджеров в Украине» по программе TACIS № EUC 9701. – К. :ІЕЕ НТУУ «КПІ», 1999. – 156 с.
11. Monitoring and Targeting in large companies // Energy Efficiency Enquiries Bureau, ETSU, Harwell, Oxfordshire, OX11. Good Practice Guide 112. – 1998. – 45p.
12. Jones Phil. Getting started with Monitoring & Targeting (M&T) / Phil Jones // Fundamental Series. – 2004. – №7. – P.29–32.
13. Monitoring and Targeting in large companies // Energy Efficiency Enquiries Bureau, ETSU, Harwell, Oxfordshire, OX11. Good Practice Guide 112. – 1998. – 45p.
14. Хайд Д. Целевой энергетический мониторинг в системе энергетического менеджмента / Д. Хайд, А.В. Лоскутов // Промышленная энергетика. – 1998. – №4. – С.2–4.
15. Лоскутов А.В. Целевой энергетический мониторинг как составная часть энергетического менеджмента / А.В. Лоскутов, Е.П. Бочаров // Деловой визит – 1998. – №7. – С.18–19.
16. Loskutov A. Monitoring and Targeting in Russian Industry / A. Loskutov // Seminar «Energy management: Low cost energy saving Techniques» : Sofia, Bulgaria, April 1997.
17. Праховник А.В. Контроль і нормалізація енергоспоживання / А.В. Праховник, Г.Р. Трапп // Управління енерговикористанням : зб.доп. – К.: Альянс за збереження енергії, 2001.– С.387–398.
18. Андрижиевский А.А. Энергосбережение и энергетический менеджмент: [учеб. пособие] / А.А. Андрижиевский, В.И. Володин. – [2-е изд., испр.]. – Мн.: Выш.шк., 2005. – 294 с.
19. Бориченко О.В. Інтегрована система контролю ефективності використання електричної енергії у виробництві: дис. ...канд. техн. наук : 05.14.01 / Бориченко Олена Володимирівна. – К., 2011. – 196 с.
20. Шанченко Н.І. Економетрика / Н.І. Шанченко. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 79с.

21. Находов В.Ф. Экономико-организационные основы энергосбережения / В.Ф.Находов. – К.: Энергетический центр ЕС в Киеве, 1995. – 150 с.
22. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: [учеб. пособие для вузов] / В.Е. Гмурман. – [9-е изд., стер.]. – М.: Высш. шк, 2003. – 479 с.: ил.
23. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества / Р. Шторм. – М.: Мир, 1970. – 368 с.
24. Тарасюк Г.М. Управління проектами: [навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.] / Г.М. Тарасюк. – [2-е вид.]. – К.: Каравела, 2006. – 320 с.
25. Ламакин Г.Н. Основы менеджмента в электроэнергетике : [учеб. пособие] / Г.Н. Ламакин. – [1-е изд.]. – Тверь : ТГТУ, 2006. – 208 с.
26. Экспертные оценки и их применение в энергетике / [Вартазаров И.С., Горлов И.Г., Минаев Е.В., Хвастунов Р.М.]; под ред. Р.М. Хвастунова. – М.: Энергоиздат, 1981. – 188 с., ил.
27. Экспертные оценки в научно-техническом прогнозировании / [Добров Г.М., Ершов Ю.В., Левин Е.И., Смирнов Л.П.]. – К.: Наук. думка, 1974. – 160 с. – (Редакция математики и кибернетики).
28. Ю.П. Сурмин. Методология и методы социологических исследований : [уч. пос.] / Сурмин Ю.П., Туленков Н.В. — К. : МАУП, 2000. — 304 с.: ил.
29. Г.В. Щекин. Система социологического знания : [уч. пос.] / Щекин Г.В. — 4-е изд. — К.: МАУП, 2001. — 208 с.
30. Экспертные оценки в социологических исследованиях / [Крымский С.Б., Жилин Б.Б., Паниотто В.И. и др.]; отв. ред. С.Б. Крымский. – К. : Наук. думка, 1990. – 320 с.
31. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ : в 2 кн. / Н. Дрейпер, Г. Смит; пер. с англ. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
32. Ивченко Г.И. Математическая статистика: [учеб. пособие для вузов] / Г.И. Ивченко, Ю.И. Медведев. – М. : Высш. шк., 1984. – 248с. : ил.



33. А.А. Цыплаков. Некоторые эконометрические методы. Метод максимального правдоподобия в эконометрии : [уч. пос.] / Цыплаков А.А. – Новосибирск: ЭФ НГУ, 1997. – 129с.
34. Калинина В.Н. Введение в многомерный статистический анализ: учебное пособие / В.Н. Калинина, В.И. Соловьев. – М., 2003. – 66 с.
35. Суслов В. И. Эконометрия / В. Суслов, Н. Ибрагимов, Л. Талышева. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. – 744 с.
36. Уилкс С. Математическая статистика; [пер. с англ. А.М. Кагана, Л.А. Халфина, О.В. Шалаеского]. – М. : Наука, 1967. – 632с. : ил.
37. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. В 2 т.: [учеб. для вузов] / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – Т.1. Теория вероятностей и прикладная статистика. –[2-е изд., испр.]. – М.: ЮНИТИ–ДАНА, 2001. – 656 с.
38. Вознесенский В.А. Принятие решений по статистическим моделям / А.В. Вознесенский, А.Ф. Ковальчук. – М.: Статистика, 1978. – 192 с.
39. Э.Е. Тихонов. Методы прогнозирования в условиях рынка : учебное пособие. - Невинномысск, 2006. – 221 с.
40. Технические аспекты энерготехнологического анализа [Электронный ресурс] // Новости электротехники. – 2003. – №4(22). – Режим доступа до журн. :<http://news.elteh.ru/arh/2003/22/15.php>.
41. Никифоров Г. В. Анализ устойчивости регрессионных моделей электропотребления [Текст] / Г. В. Никифоров // Промышленная энергетика. – 1999. - № 12. – С. 18-20.
42. Гнатюк, В. И. Оценка адекватности работы динамической адаптивной модели электропотребления [Текст] / В. И. Гнатюк, С. Н. Гринкевич, Д. В. Луценко // Электрика. – 2006. - № 12. – С. 36 – 39.
43. Лисичкин В. А. Теория и практика прогностики / В.А. Лисичкин. – М.: Наука, 1972. – 223с.

44. Похабов В.И. Энергетический менеджмент на промышленных предприятиях [Текст] / В.И. Похабов, В.И. Клевзович, В.В. Ворфоломеев // Изд. Технопринт, 2002. – 176 с.
45. Боровиков В.Н. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов [Текст] / В.Н. Боровик. – СПб.: Питер, 2001. – 356 с.
46. Літнарівч Р.М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу. Навчальний посібник [Текст] / Р.М. Літнарівч. – Рівне: МЕРУ, 2011. –140 с.
47. Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей «Розроблення стартар-проекту»/ Київ, НТУУ «КПІ ім.. Ігоря Сікорського», 2016 р.